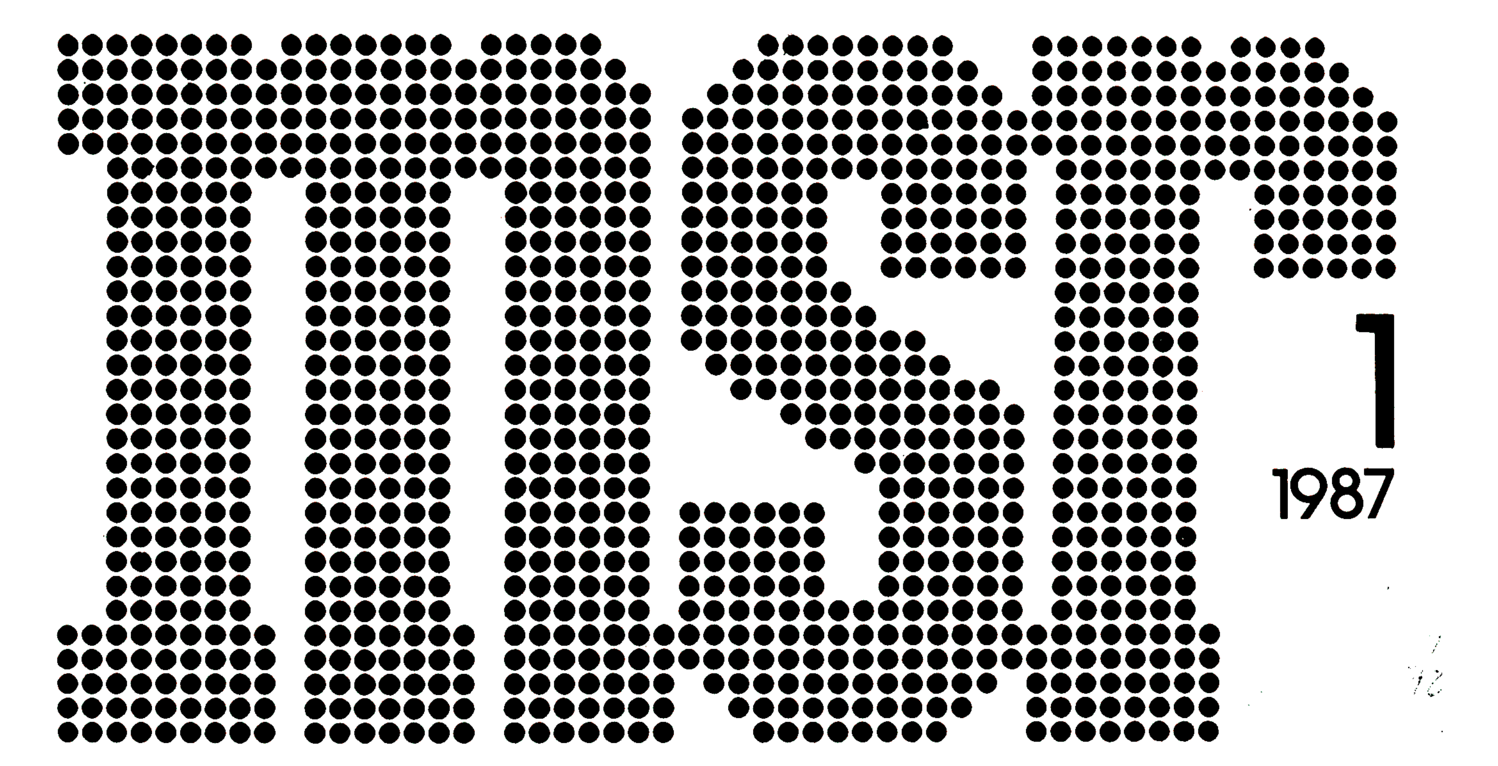
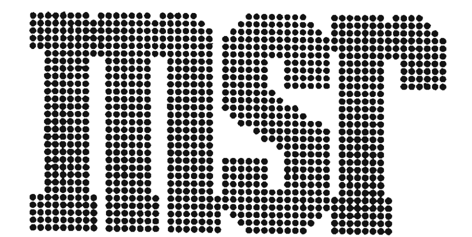


messen·steuern·regeln

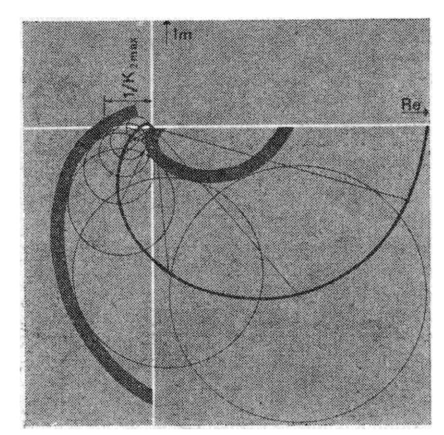


VEB
Verlag Technik
Berlin
EVP: 4,– M



messen·steuern·regeln

Wissenschaftlich-technische
Zeitschrift für die
Automatisierungstechnik



Beim Entwurf von Mehrgrößenregelungen im Frequenzbereich haben die Gershgorin-Bänder große praktische Bedeutung. Mit ihrer Hilfe kann man einfach den Einfluß der Kopplung auf die Ersatzstrecken abschätzen. Unser Titelbild zeigt die Konstruktion des Gershgorin-Bandes für eine der Hauptstrecken einer Zweigrößenregelung. Für den rechnergestützten Entwurf ist die Abschätzung der oberen Grenzfrequenz, bis zu der die Untersuchung notwendig ist, von Interesse. Näheres dazu vermittelt der Beitrag auf S. 7.

Titelgrafik: *G. Schwesinger*

Herausgeber:

Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA) in der KDT

1

30. Jahrgang
Januar 1987

VEB
VERLAG TECHNIK

AUFSÄTZE

ISSN 0026-0347

J. Lunze; B. v. Kurnatowski

Experimentelle Erprobung einer Einstellregel für PI-Mehrgrößenregler bei der Herstellung von Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung

0. Einleitung

Im VEB Kombinat Agrochemie Piesteritz wurde eine Anlage zur Herstellung des Flüssigdüngers Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung (AHL) auf der Basis eigener Zwischenprodukte errichtet. Dabei bestand die Aufgabe, diese Anlage von einer vorhandenen Meßwarte aus ohne zusätzliches Bedienpersonal zu betreiben. Somit war eine Automatisierungseinrichtung erforderlich, die es ermöglicht, die Anlage bei normalen Störungen stabil zu betreiben und enge Qualitätsgrenzen des erzeugten Produktes einzuhalten [3]. Da sich der technologische Prozeß als „echte" Mehrgrößenregelstrecke mit 2 Ein- und Ausgängen erwies und die Regelgrößen nur indirekt berechnet werden konnten, wurden der erforderliche Regelalgorithmus auf einem Prozeßrechner implementiert und damit die Sollwerte der konventionellen Analogregler geführt.

Im folgenden wird ein Lösungsweg für die Modellierung der Anlage und den Entwurf des Mehrgrößenreglers aufgezeigt. Die Identifikation erfolgt durch die Auswertung von Sprungantwortexperimenten, wobei stark gestörte Meßdaten und große Zeitkonstanten der Übergangsfunktionen typisch sind und eine exakte Modellierung unmöglich machen. Dennoch werden beim Entwurf die Regelparameter vollständig bestimmt, wobei die skalaren Tuning-Parameter am Modell eingestellt werden und — im Gegensatz zu bekannten Verfahren [1] und [10] — keine weiteren Experimente erfordern. Das zeitvariable Verhalten der Strecke sowie die Nichtlinearität bei wechselnden Arbeitspunkten erfordern bestimmte Robustheitsuntersuchungen im Anschluß an den Entwurf.

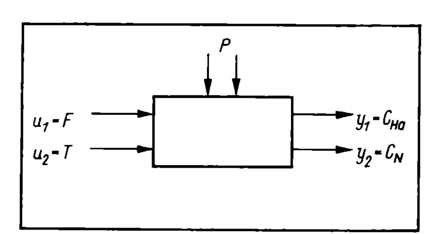


Bild 1. AHL-Anlage als Zweigrößen-Regelstrecke
F Zuflußmenge der Harnstofflösung; *T* Temperatur des Eingangsgemisches; C_{Ha} Harnstoffkonzentration im Produkt; C_N Stickstoffkonzentration im Produkt; *p* Störgrößen

Bei jedem Lösungsschritt werden die theoretischen Ergebnisse direkt auf das praktische Beispiel angewendet und diskutiert. Der so entworfene PI-Mehrgrößenregler wurde experimentell erprobt und befindet sich seit mehr als zwei Jahren im Dauerbetrieb.

1. Regelungstechnische Aufgabenstellung

Die Aufgabe besteht im Entwurf und der Realisierung einer Mehrgrößenregelung für die AHL-Anlage. Dabei sind folgende Forderungen an das geregelte System einzuhalten:

(I) Das geregelte System soll stabil arbeiten.
(II) Die vorgegebenen Arbeitspunkte sollen ohne bleibende Regelabweichungen eingehalten werden.
(III) Die Führungsübergangsfunktionen sollen wenig überschwingen ($\Delta h_{ij} = 10\% \dots 20\%$), möglichst schnell einschwingen ($T_{5\%}$ etwa 1 h) und für die einzelnen Regelgrößen weitestgehend entkoppelt sein. Die Auswirkungen sprungförmiger Störungen sollen innerhalb von etwa 1 h abgebaut sein.
(IV) Der Regler soll fest eingestellt in einem möglichst weiten Lastbereich einsetzbar sein.

Für die Modellierung der AHL-Anlage als Mehrgrößenregelstrecke und den Entwurf des Reglers können folgende Annahmen als erfüllt betrachtet werden:

1. Die Regelstrecke ist in der Umgebung der einzelnen Arbeitspunkte linear und kann durch

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{x}(k+1) &= \boldsymbol{A}\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{B}\boldsymbol{u}(k) + \boldsymbol{E}\boldsymbol{p}(k)\,, \quad \boldsymbol{x}(0) = \boldsymbol{x}_0 \\ \boldsymbol{y}(k) &= \boldsymbol{C}\boldsymbol{x}(k) + \boldsymbol{F}\boldsymbol{p}(k) \end{aligned}\right\} \quad (1)$$

beschrieben werden, wobei $\boldsymbol{x}$ der n-dimensionale Zustandsvektor, $\boldsymbol{u} = (u_1, u_2)^T$, $\boldsymbol{y} = (y_1, y_2)^T$ und $\boldsymbol{p}$ die Vektoren der Stell-, Regel- und Störgrößen sind und $\boldsymbol{A} \dots \boldsymbol{F}$ Matrizen mit konstanten Elementen darstellen (Bild 1).

2. Aufgrund von Nichtlinearitäten im Verhalten der Regelstrecke im Großen und zeitveränderlichen Parametern verändern sich die Matrizen $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{F}$ des linearisierten Modells (1) während des Betriebes der Regelstrecke. Es wird angenommen, daß diese Veränderungen im Vergleich zu den Zeitkonstanten der geregelten und ungeregelten Anlage so langsam ablaufen, daß die Strecke durch das zeitinvariante Modell (1) mit verschiedenen Parametersätzen $\boldsymbol{A}^{(l)}$, $\boldsymbol{B}^{(l)}$, $\boldsymbol{C}^{(l)}$ $(l = 1, 2, \dots, q)$, von denen jeder die Regelstrecke bei einer bestimmten Betriebsbedingung charakterisiert, beschrieben werden kann.

3. Die Störungen setzen sich aus hochfrequenten stochastischen und niederfrequenten deterministischen Anteilen zusammen. Bei der Modellbildung (Abschn. 3.) spielen nur die stochastischen Störungen eine Rolle. Sie können als Ausgangssignal eines Störfilters $\boldsymbol{G}_f$ beschrieben werden, an dessen Eingang ein weißes Rauschen $\boldsymbol{w}(k)$ anliegt. Im Vergleich zu den Prozeßzeitkonstanten kann die Störung als stationär angenommen werden

$$\boldsymbol{p}(k) = \sum_{i=1}^{k} \boldsymbol{G}_f(i)\, \boldsymbol{w}(k-i)\,. \quad (2)$$

Die deterministischen Störungen werden beim Reglerentwurf (Abschn. 4.) durch sprungförmige Signale approximiert und gemäß Güteforderung (III) beachtet.

4. Die Führungsgröße $\boldsymbol{v}(k)$ ändert sich typischerweise sprungförmig, und die deterministischen Störungen können (im Zeitmaßstab des Übergangsverhaltens) durch sprungförmige Signale ersetzt werden. Als Regler wird daher ein PI-Regler der Form

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{x}_r(k+1) &= \boldsymbol{x}_r(k) + \boldsymbol{y}(k) - \boldsymbol{v}(k) \\ \boldsymbol{u}(k) &= \boldsymbol{K}_{P1}\boldsymbol{y}(k) + \boldsymbol{K}_{P2}\boldsymbol{v}(k) + \boldsymbol{K}_I\boldsymbol{x}_r(k) \end{aligned}\right\} \quad (3)$$

eingesetzt, wobei die Matrizen $\boldsymbol{K}_{P1}$ und $\boldsymbol{K}_{P2}$ den P-Anteil und $\boldsymbol{K}_I$ die I-Verstärkung darstellen.

2. Lösungsweg für die Modellierung und den Entwurf

Für die Bestimmung der Reglerparameter müssen die AHL-Anlage als Mehrgrößenregelstrecke modelliert, ein systematisches Verfahren zum Reglerentwurf angewendet und die Güteforderungen (I) bis (IV) überprüft werden. Die Lösung dieser Teilaufgaben bringt besondere Schwierigkeiten mit sich, weil bei der experimentellen Prozeßanalyse sehr große stochastische Störungen auftreten und beim Entwurf die zeitlichen Veränderungen im Verhalten der Regelstrecke berücksichtigt werden müssen. Aus diesen Gründen sind die bekannten Methoden zur Identifikation und zum Reglerentwurf nicht unmittelbar anwendbar, und es machen sich Modifikationen und Erweiterungen dieser Methoden erforderlich.

So werden bei den statistischen Parameterschätzverfahren stochastische Störungen betrachtet, die einem weißen Rauschen entsprechen (Schätzung mit der Methode der kleinsten Quadrate) oder bei denen das Störfilter (2) bekannt ist (Markov-Schätzung) [14]. Diese Voraussetzungen sind bei der AHL-Anlage nicht annähernd erfüllt. Außerdem waren die in der Literatur behandelten Prozesse Störungen ausgesetzt, die wesentlich kleiner als die auf die AHL-Anlage wirkenden Störungen waren. Andererseits verwenden die von Experimenten mit der Regelstrecke aus

Dr. sc. techn. *Jan Lunze* (34) studierte von 1970 bis 1974 an der Sektion Technische und Biomedizinische Kybernetik der TH Ilmenau. Seit 1974 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse der AdW der DDR, Bereich Regelungssysteme, Dresden. 1980 Promotion A (Entwurf dezentraler Regler), 1983 Promotion B (Robuste Mehrgrößenregelung)

Dipl.-Ing. *Bernd v. Kurnatowski* (35) studierte von 1968 bis 1973 Technische Kybernetik an der TH „Otto von Guericke" Magdeburg. Seitdem Problemanalytiker und Fachingenieur für kontinuierliche Steuerungen im VEB ACK Piesteritz, Abteilung Prozeßsteuerung und -lenkung.

gehenden Einstellregeln für Mehrgrößenregler meist nur die statischen Verstärkungsfaktoren [1] [2] [4] und [10] bzw. Toleranzbänder für die Übergangsfunktionen [8] als Informationen über den zu regelnden Prozeß und berücksichtigen damit nicht alle tatsächlich verfügbaren Kenntnisse. In den erstgenannten Arbeiten konnte der Regler daher nur bis auf unbekannte Tuning-Parameter bestimmt werden, so daß für die Festlegung der Tuning-Parameter weitere Experimente erforderlich waren.
Bei der Lösung der Regelungsaufgabe für die AHL-Anlage wurde deshalb in folgenden Schritten vorgegangen:

1. Aufstellung von dynamischen Modellen (1) für die AHL-Anlage anhand des Übergangsverhaltens, das unter unterschiedlichen Betriebsbedingungen aufgenommen wurde.
2. Entwurf des Reglers am Modell (1) für einen ausgewählten Parametersatz $(\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}, \boldsymbol{C})$.
3. Untersuchung des geregelten Systems für alle Betriebsbedingungen, die durch $\boldsymbol{A}^{(l)}, \boldsymbol{B}^{(l)}, \boldsymbol{C}^{(l)}$ $(l = 1, \ldots, q)$ charakterisiert sind.
4. Implementierung des Reglergesetzes auf einem Prozeßrechner und Erprobung der Regelung.

Im folgenden werden diese Schritte im einzelnen beschrieben, wobei zunächst jeweils auf den Lösungsweg allgemein und danach auf dessen Anwendung auf das praktische Regelungsproblem eingegangen wird.

3. Modellierung

Bei der Modellierung müssen die Matrizen $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ und $\boldsymbol{C}$ des Modells (1) bestimmt werden (für Störverhalten siehe Abschn. 5.). Dafür werden Experimente mit dem Prozeß durchgeführt, wobei aufgrund des ungünstigen Störsignal-Nutzsignal-Verhältnisses und der großen Zeitkonstanten des Prozesses sprungförmige Testsignale (Stellgrößenänderungen) verwendet und die Übergangsfolgen aufgezeichnet werden. Das heißt, für $\boldsymbol{u}(k) = \bar{\boldsymbol{u}}$, $k \geqq 0$ wird

$$\left.\begin{aligned} &\boldsymbol{y}(k) = \boldsymbol{H}(k)\,\bar{\boldsymbol{u}} + \sum_{i=0}^{k} \boldsymbol{G}(i)\,\boldsymbol{p}(k-i) \\ &(k = 1, 2, \ldots, N) \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

mit

$$\boldsymbol{H}(k) = \sum_{i=1}^{k} \boldsymbol{C}\boldsymbol{A}^{i-1}\boldsymbol{B}\,,$$
$$\boldsymbol{G}(k) = \boldsymbol{C}\boldsymbol{A}^{k}\boldsymbol{E}\,, \qquad k \geqq 1$$
$$\boldsymbol{G}(0) = \boldsymbol{F}$$

gemessen, wobei $\boldsymbol{x}_0 = \boldsymbol{0}$ vorausgesetzt ist (Bild 2). Für ein Zweigrößensystem sind zwei Experimente mit linear unabhängigen Vektoren $\bar{\boldsymbol{u}}$, z. B. mit $\bar{\boldsymbol{u}}^1 = \begin{pmatrix}1\\0\end{pmatrix}$ und $\bar{\boldsymbol{u}}^2 = \begin{pmatrix}0\\1\end{pmatrix}$ notwendig, um die Übergangsfolgematrix $\boldsymbol{H}(k)$ aus den Meßwertfolgen $\boldsymbol{y}^1(k)$ und $\boldsymbol{y}^2(k)$ zu erhalten

$$(\boldsymbol{y}^1(k) \,\vdots\, \boldsymbol{y}^2(k)) = \boldsymbol{H}(k) + (\tilde{\boldsymbol{p}}^1(k) \,\vdots\, \tilde{\boldsymbol{p}}^2(k))\,.$$

Diese Gleichung wird abgekürzt als Matrizengleichung

$$\boldsymbol{Y}(k) = \boldsymbol{H}(k) + \tilde{\boldsymbol{P}}(k) \tag{5}$$

geschrieben, wobei die Zuordnung der Matrixelemente y_{ij}, p_{ij} und h_{ij} zu den Meß- bzw. Systemgrößen aus einem Vergleich mit der vorangehenden Gleichung offensichtlich wird. In (5) ist die stochastische Störung auf den Ausgang des Prozesses transformiert (Bild 3). Wegen (2) und (4) kann $\tilde{p}_{ij}(k)$ als ein über ein Filter $\tilde{G}_{fij}$ aus einem stationären weißen Rauschprozeß gebildetes Signal interpretiert werden.
Die Schwierigkeit bei der Umsetzung der „Meßkurvenmatrix" $\boldsymbol{Y}(k)$ in ein Modell der Form (1) besteht in der dafür notwendigen Trennung der deterministischen Anteile von den stochastischen, die durch die Summenbildung auf der rechten Seite von (5) überlagert sind (Bild 3). Diese Trennung wird hier so vorgenommen, daß zunächst für die Meßkurven $y_{ij}(k)$ Trendfunktionen $\hat{h}_{ij}(k)$ gebildet werden, die als Übergangsfolgen des Prozesses interpretiert und, z. B. mit einem Approximationsverfahren aus [13], in Elemente der Matrizen $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ und $\boldsymbol{C}$ umgerechnet werden. Danach wird überprüft, ob die Differenz $\hat{p}_{ij}(k) = y_{ij}(k) - \hat{h}_{ij}(k)$ zwischen den Übergangsfolgen des Modells und den Meßwertfolgen über ein lineares Filter $\hat{G}_{fij}$ aus einem stationären weißen Rauschprozeß w_{ij} gebildet werden kann. Da die dabei erhaltenen Folgen die wahren Folgen $\boldsymbol{H}(k)$ und $\tilde{\boldsymbol{P}}(k)$ nur näherungsweise wiedergeben, werden sie durch ein Dach „^" gekennzeichnet.
Während der erste Schritt in der Regelungstechnik allgemein üblich ist und hier nicht erläutert zu werden braucht, soll der zweite Schritt noch etwas genauer ausgeführt werden. Dieser zweite Schritt macht sich notwendig, weil die Differenz zwischen der Trendfunktion und der Meßkurve bis 50% des statischen Endwertes der Trendfunktion erreicht (Bild 4) und es

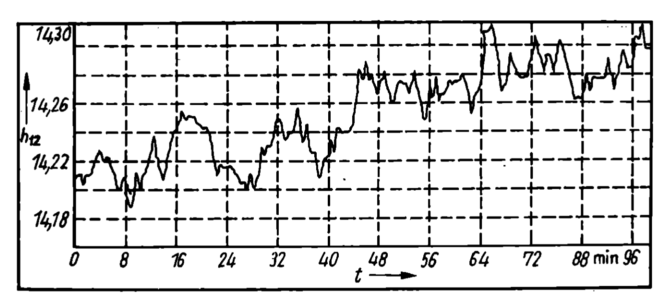


Bild 2. Meßgröße für die Übergangsfolge $h_{11}(k)$, Tastzeit 0,5 min

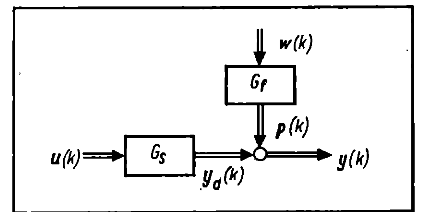


Bild 3. Zerlegung der Meßgröße $\boldsymbol{y}(k)$ in einen deterministischen und einen stochastischen Anteil

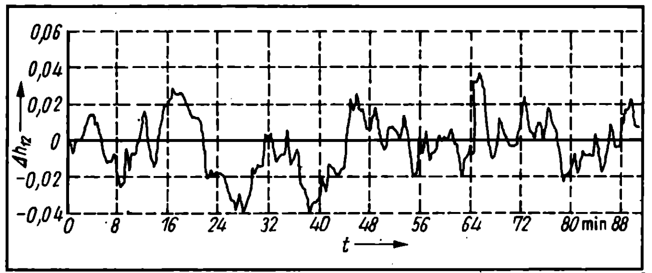


Bild 4. Differenz zwischen Meßgröße und Ausgang des Näherungsmodells

auch bei genauer Kenntnis der Regelstrecke „AHL-Anlage" nicht gerechtfertigt ist, ohne zusätzliche Überlegungen eine einfache Trendfunktion 2. Ordnung als Abbild des deterministischen Anteils der Meßkurve zu verwenden. Es muß also nachgewiesen werden, daß die Differenzkurve tatsächlich das Abbild einer stochastischen Störung sein kann.
Der Einfachheit halber wird die Untersuchung von $\hat{P}_{ij}$ für alle (i, j) einzeln vorgenommen, so daß für diese Betrachtungen die Indizes weggelassen werden können. Außerdem sei im folgenden die Klasse der Filter $\hat{G}_f$ auf Systeme 1. Ordnung beschränkt, obwohl die Theorie allgemein angewendet werden kann [9].
Die Aufgabe besteht in der Bestimmung eines Filters $\hat{G}_f$ nach (6) und eines Rauschprozesses $w(k)$, so daß $\hat{p}(k)$ durch

$$\hat{p}(k+1) = -\hat{a}\hat{p}(k) + \hat{a}w(k) \tag{6}$$

bestimmt wird. Der Modellparameter $\hat{a}$ wird aus der Autokovarianzfolge

$$R_{pp}(k) = \frac{1}{N-k+1} \sum_{i=0}^{N-k} \hat{p}(i)\,\hat{p}(i+k)$$

des Prozesses $\hat{p}(k)$ ermittelt

$$\hat{a} = \frac{R_{pp}(1)}{R_{pp}(0)}\,.$$

Dann wird durch Umstellung von (6) der Rauschprozeß $w(k)$ berechnet, der $\hat{p}$ über $\hat{G}_f$ erzeugt. Für $w(k)$ wird die Autokorrelationsfolge

$$R_{ww}(k) = \frac{1}{N-k+1} \sum_{i=0}^{N-k} w(i)\,w(i+k)$$

gebildet und überprüft, ob $R_{ww}(k)$ im Hinblick auf ein bestimmtes Signifikanzniveau einen weißen Rauschprozeß beschreibt. Dafür gibt es zwei Tests [9]:

(a) $$|R_{ww}(k)| < \frac{2}{\sqrt{N}} \tag{7}$$

N Anzahl der Meßwerte

(b) Es wird die Testgröße

$$Q = \tilde{N} \sum_{k=1}^{\tilde{N}} R_{ww}^2(k) \tag{8}$$

gebildet, wobei N so groß gewählt wird, daß $R_{ww}(k)$ mit $k > \tilde{N}$ keinen wesentlichen Beitrag mehr zu Q liefert. Q ist chi-quadrat-verteilt mit $\tilde{N} - 1$ Freiheitsgraden und muß kleiner sein als der aus einer Tafel abzulesende Wert, damit die Hypothese „w ist ein weißer Rauschprozeß" nicht abgelehnt wird.

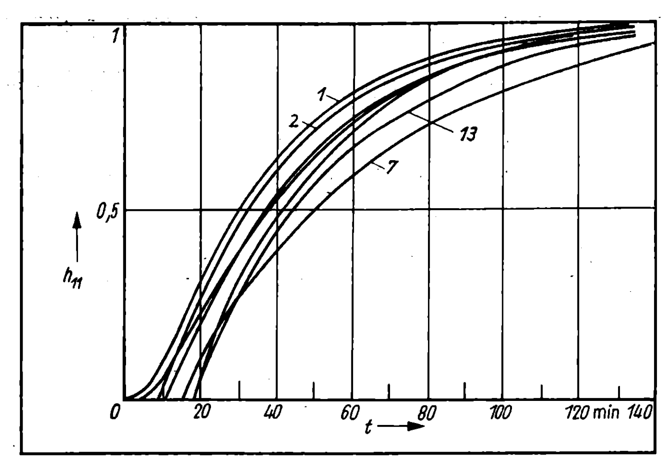


Bild 5. Übergangsfolgen $h_{11}(k)$, normiert auf den statischen Endwert (lfd. Nr. und Parameter vgl. Tafel)

Tafel. Parameter der Näherungsmodelle für die Übergangsfolge $h_{11}(k)$ (Parametersatz 1 ≙ Nominalverhalten)

T_2-Modelle	Zeitkonstante 1	Zeitkonstante 2	Statik	lfd. Nr.
	10 min	27 min	1,68	1
	19 min	19 min	1,87	2
T_tT_1-Modelle	Totzeit	Zeitkonstante	Statik	
	11 min	33 min	1,68	3
	9 min	32 min	1,87	4
	10 min	28 min	1,86	5
	8 min	30 min	1,62	6
	15 min	50 min	2,12	7
	13 min	36 min	2,02	8
	14 min	30 min	1,45	9
	17 min	31 min	2,03	10
	18 min	48 min	1,96	11
	18 min	32 min	1,46	12
	18 min	38 min	1,78	13

Sind diese beiden Tests erfüllt, so kann die vorgenommene Aufspaltung des Meßsignales in den deterministischen und den stochastischen Anteil als sinnvoll angesehen und (1) mit den erhaltenen Matrizen $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$ und $\boldsymbol{C}$ als Modell für das E/A-Verhalten des Prozesses bezüglich $\boldsymbol{u}$ und $\boldsymbol{y}$ verwendet werden.
In Anwendung dieser Methode für die Modellierung der AHL-Anlage wurde in die im Bild 2 dargestellte Meßwertfolge $y_{12}(k)$ — nach entsprechender Nullpunktverschiebung und Skalierung — die Übergangsfolge eines Systems 2. Ordnung als Trend eingepaßt (Zeitkonstanten $T_1 = 20$ min, $T_2 = 26$ min, Verstärkungsfaktor $k_{12} = 0{,}033$). Die dabei entstehende Fehlerkurve $\hat{p}(k)$ (Bild 4) kann durch das Filter (6) mit $\hat{a} = -0{,}86$ aus einem weißen Rauschen gebildet werden, denn für die Autokorrelationsfolge $R_{\mathrm{ww}}(k)$ der ermittelten Eingangsfolge $w(k)$ sind die beiden angegebenen Testbedingungen erfüllt ($N = 181$):

$$R_{\mathrm{ww}}(k) = (1{,}00;\ 0{,}09;\ 0{,}05;\ -0{,}15;\ 0{,}02;\ 0{,}09;\ -0{,}05;\ -0{,}10;\ 0{,}03;\ 0{,}03;\ 0{,}03;\ -0{,}07;\ 0{,}09\ \ldots)$$

$$|R_{\mathrm{ww}}(k)| < 0{,}127 \quad \text{für} \quad k \geqq 1$$

$$Q = 15{,}4 < \chi^2_{12;0,9} = 18{,}55\,.$$

Auf diese Weise können aus Experimenten, die an unterschiedlichen Arbeitspunkten ausgeführt werden, verschiedene Parametersätze $\boldsymbol{A}^{(l)}$, $\boldsymbol{B}^{(l)}$, $\boldsymbol{C}^{(l)}$ ($l = 1, 2, \ldots, q$) ermittelt werden, wobei jeder einzelne das Streckenverhalten für eine bestimmte Betriebsbedingung beschreibt und alle gemeinsam einen Überblick über die möglichen Verhaltensweisen der Anlage geben. Die Tafel vermittelt einen Eindruck von der Streubreite der Parameter für das Element $\hat{h}_{11}(k)$ der Übergangsfolgematrix. In Erweiterung des Modellansatzes (1) wurden dabei auch T_tT_1-Glieder zur Approximation der deterministischen Anteile der Meßkurven verwendet. Auffallend ist die breite Streuung des statischen Verstärkungsfaktors innerhalb eines Intervalls $0{,}7\hat{k}_{\mathrm{s}11} \ldots 1{,}3\,\hat{k}_{\mathrm{s}11}$ um den Mittelwert $\hat{k}_{\mathrm{s}11}$. Demgegenüber sind die Unterschiede im dynamischen Verhalten relativ klein, wie die Darstellung der auf den statischen Endwert normierten Übergangsfolgen zeigt (Bild 5).

4. Entwurf

Die Reglerparameter $\boldsymbol{K}_{\mathrm{P1}}$, $\boldsymbol{K}_{\mathrm{P2}}$, $\boldsymbol{K}_{\mathrm{I}}$ müssen entsprechend den Güteforderungen (I) bis (IV) so gewählt werden, daß das geregelte System (1) und (3)

$$\left.\begin{aligned} \bar{\boldsymbol{x}}(k+1) &= \bar{\boldsymbol{A}}^{(l)}\bar{\boldsymbol{x}}(k) + \bar{\boldsymbol{B}}^{(l)}\boldsymbol{v}(k)\,, \qquad \bar{\boldsymbol{x}}(0) = \bar{\boldsymbol{x}}_0 \\ \boldsymbol{y}(k) &= \bar{\boldsymbol{C}}^{(l)}\bar{\boldsymbol{x}}(k) \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

mit

$$\bar{\boldsymbol{A}}^{(l)} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{A}^{(l)} + \boldsymbol{B}^{(l)}\boldsymbol{K}_{\mathrm{P1}}\boldsymbol{C}^{(l)} & \boldsymbol{B}^{(l)}\boldsymbol{K}_{\mathrm{I}} \\ \boldsymbol{C}^{(l)} & \boldsymbol{I} \end{pmatrix}$$

$$\bar{\boldsymbol{B}}^{(l)} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{B}^{(l)}\boldsymbol{K}_{\mathrm{P2}} \\ -\boldsymbol{I} \end{pmatrix}$$

$$\bar{\boldsymbol{C}}^{(l)} = (\boldsymbol{C}^{(l)} \quad \boldsymbol{0})$$

$$\bar{\boldsymbol{x}} = (\boldsymbol{x}', \boldsymbol{x}_{\mathrm{r}}')'$$

für alle Betriebsbedingungen ($l = 1, \ldots, q$) stabil ist und die gegebenen Forderungen an das Führungsverhalten erfüllt. Für die Lösung dieser Entwurfsaufgabe ist zunächst nachzuprüfen, ob die Unterschiede der Regelstreckenmodelle $\boldsymbol{A}^{(l)}$, $\boldsymbol{B}^{(l)}$, $\boldsymbol{C}^{(l)}$ klein genug sind, damit ein fest eingestellter Regler (3) gefunden werden kann, für den alle geregelten Systeme $\boldsymbol{A}^{(l)}$, $\boldsymbol{B}^{(l)}$, $\boldsymbol{C}^{(l)}$ stabil sind. In [7] wurde nachgewiesen, daß die ***Existenz eines solchen Reglers*** nur vom statischen Verhalten der Regelstrecke (1) abhängt. Hinreichend ist, daß die Bedingung

$$\lambda_{\mathrm{P}}(\bar{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{s}}\,|\hat{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{s}}^{-1}|) < 1 \tag{10}$$

erfüllt ist, wobei $\hat{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{s}}$ die Matrix der „mittleren" Verstärkungsfaktoren, $\bar{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{s}}$ eine obere Schranke für die Differenz $\boldsymbol{K}_{\mathrm{s}}^{(i)} - \hat{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{s}}$ und $\lambda_{\mathrm{P}}(.)$ den größten Eigenwert der angegebenen Matrix bezeichnen. Die senkrechten Striche $|.|$ bedeuten, daß jedes Element der Matrix durch seinen Betrag zu ersetzen ist.
Für die AHL-Anlage führt die Auswertung der statischen Endwerte der Meßkurven auf

$$\hat{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{s}} = \begin{pmatrix} 2{,}2 & 0{,}033 \\ -0{,}26 & 0{,}09 \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \bar{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{s}} = \begin{pmatrix} 0{,}7 & 0{,}01 \\ 0{,}1 & 0{,}03 \end{pmatrix}. \tag{11}$$

Das heißt, daß die Matrizen $\boldsymbol{K}_{\mathrm{s}}^{(i)}$ der beim i-ten Experiment ermittelten Verstärkungsfaktoren in der Form

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{s}}^{(l)} = \hat{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{s}} + \delta\boldsymbol{K}_{\mathrm{s}}^{(l)} \quad \text{mit} \quad |\delta\boldsymbol{K}_{\mathrm{s}}^{(l)}| \leqq \bar{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{s}} \tag{12}$$

dargestellt werden können. Mit diesen Werten ist die Existenzbedingung (10) erfüllt

$$\lambda_{\mathrm{P}}(\bar{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{s}}\,|\,\hat{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{s}}^{-1}|) = 0{,}1 < 1\,.$$

Bei der *Wahl der Reglermatrizen* wird die in [6] [8] und [11] angegebene Zerlegung

$$\boldsymbol{K}_{\mathrm{P1}} = -\beta_1\hat{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{s}}^{-1}\,, \qquad \boldsymbol{K}_{\mathrm{P2}} = -\beta_2\hat{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{s}}^{-1}\,, \qquad \boldsymbol{K}_{\mathrm{I}} = -\alpha\hat{\boldsymbol{K}}_{\mathrm{s}}^{-1} \tag{13}$$

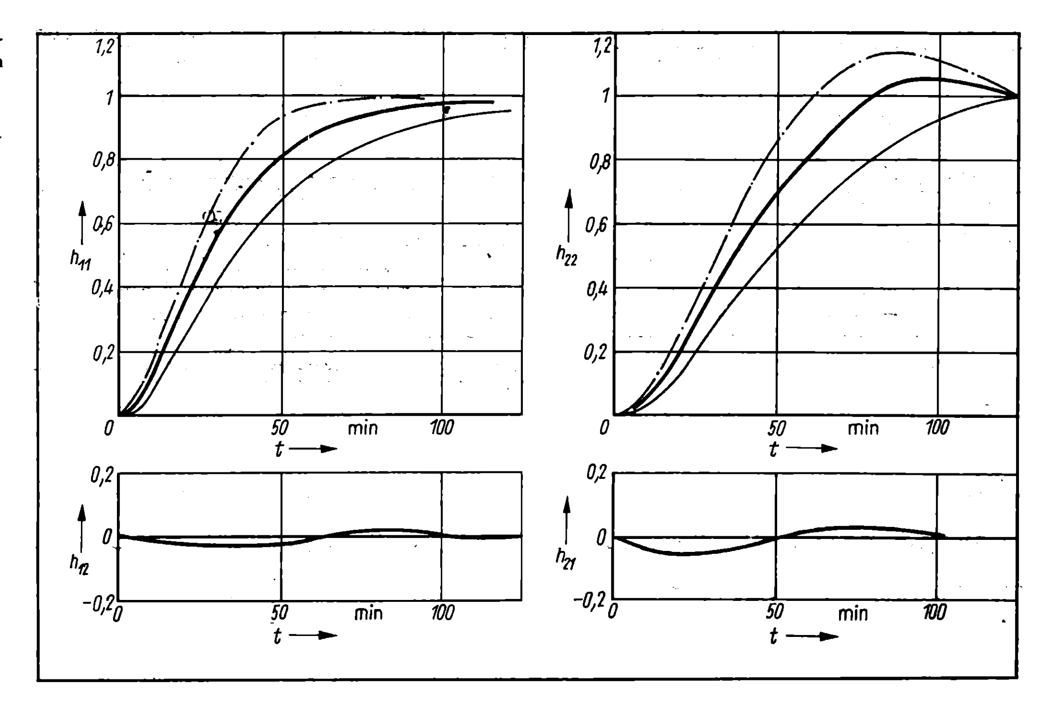
verwendet, die durch Untersuchungen der Stabilität aller Systeme (9) ($l = 1, 2, \ldots, q$) begründet ist. Für die AHL-Anlage führt diese Wahl der Reglermatrizen außerdem zu einer weitgehenden Entkopplung der Teilregelkreise. Die Parameter α, β_1 und β_2 werden dann für das Modell (1) (3) und (13) mit den aus der Menge der möglichen Parametersätze ausgewählten Nominalwerten $\boldsymbol{A}$, $\boldsymbol{B}$, $\boldsymbol{C}$ so festgelegt, daß die Güteforderungen (I) bis (III) erfüllt sind. Aufgrund der erwähnten Entkopplung der Teilregelstrecken kann dies für den betrachteten Anwendungsfall mit Hilfe von Entwurfsvorschriften für Eingrößenregelungen [2] und [12] erfolgen.
Für die AHL-Anlage wurden der für eine Tastzeit von 30 s durch (14)

$$\left.\begin{aligned} &\hat{\boldsymbol{A}} = \begin{pmatrix} 0{,}982 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0{,}049 & 0{,}951 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}981 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0{,}025 & 0{,}975 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}981 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}049 & 0{,}951 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}975 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0{,}012 & 0{,}988 \end{pmatrix}, \quad \hat{\boldsymbol{B}} = \begin{pmatrix} 0{,}018 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0{,}019 \\ 0 & 0 \\ 0{,}019 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0{,}025 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \\ &\hat{\boldsymbol{C}} = \begin{pmatrix} 0 & 2{,}2 & 0 & 0{,}033 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0{,}26 & 0 & 0{,}09 \end{pmatrix} \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

Bild 6. Elemente der Führungsübergangsfolge-Matrix der geregelten AHL-Anlage (Simulationsergebnis)

——— Nominalverhalten;

—·—·— Verhalten für andere Betriebsbedingungen



beschriebene Betriebsfall zur Beschreibung des Nominalverhaltens ausgewählt und die Reglerparameter entsprechend (11) und (13) mit

$$\left.\begin{array}{l} \alpha = 0{,}0195\,, \quad \beta_1 = 0{,}51\,, \quad \beta_2 = 1{,}18 \\ \hat{K}_s^{-1} = \begin{pmatrix} 0{,}438 & -0{,}159 \\ 1{,}25 & 10{,}6 \end{pmatrix} \end{array}\right\} \qquad (15)$$

festgelegt. Diese Reglereinstellung garantiert ein schnelles, aber überschwingfreies Einschwingen der Führungsübergangsfunktion des geregelten Nominalmodells (Bild 6).

Entsprechend der Güteforderung (IV) muß überprüft werden, ob die Merkmale (I) bis (III) unter allen Betriebsbedingungen erreicht werden. Diese *Robustheitsuntersuchungen* werden für die Stabilität und das Übergangsverhalten getrennt durchgeführt.

Die Stabilität muß unter allen Umständen gesichert sein, wobei davon ausgegangen werden muß, daß die aus den Experimenten erhaltenen q Modelle ($\boldsymbol{A}^{(l)}, \boldsymbol{B}^{(l)}, \boldsymbol{C}^{(l)}$) nicht alle auftretenden Verhaltensweisen wiedergeben und zumindest noch eine Vielzahl von Zwischenwerten möglich sind. Bereits diese q Modelle zeigen jedoch, daß die Verhaltensformen sehr vielfältig sind und nur durch stark streuende statische Verstärkungsfaktoren und Zeitkonstanten beschrieben werden können.

Deshalb wird für die Stabilitätsprüfung ein Kriterium verwendet, das auf der Beschreibung der Modellunsicherheiten durch obere Schranken basiert. Dabei wird das Modell (1) mit den Parametern (14) als Näherungsmodell

$$\left.\begin{array}{l} \hat{\boldsymbol{x}}(k+1) = \hat{\boldsymbol{A}}\hat{\boldsymbol{x}}(k) + \hat{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{u}(k) \\ \hat{\boldsymbol{y}}(k) = \hat{\boldsymbol{C}}\hat{\boldsymbol{x}}(k) \end{array}\right\} \qquad (16)$$

verwendet und der Fehler

$$\boldsymbol{f} = \boldsymbol{y} - \hat{\boldsymbol{y}} \qquad (17)$$

durch

$$\boldsymbol{f}(k) = \sum_{i=1}^{k} \boldsymbol{G}_2(i)\, \boldsymbol{u}(k-i) \qquad (18)$$

(mit zunächst unbekannter Gewichtsfolgematrix $\boldsymbol{G}_2(k)$) dargestellt. Das geregelte System wird durch (3) und (16) bis (18) beschrieben, wobei die (3), (16) und (17) für $\boldsymbol{v} = 0$ in

$$\left.\begin{array}{l} \bar{\boldsymbol{x}}(k+1) = \bar{\boldsymbol{A}}\bar{\boldsymbol{x}}(k) + \bar{\boldsymbol{E}}\boldsymbol{f}(k)\,, \\ \boldsymbol{y}(k) = \hat{\boldsymbol{C}}\bar{\boldsymbol{x}}(k) + \boldsymbol{f}(k)\,, \\ \boldsymbol{u}(k) = \bar{\boldsymbol{F}}\bar{\boldsymbol{x}}(k) + \boldsymbol{K}_{\mathrm{PI}}\boldsymbol{f}(k) \end{array}\right\} \qquad (19)$$

mit

$$\bar{\boldsymbol{E}} = \begin{pmatrix} \hat{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{K}_{\mathrm{PI}} \\ \boldsymbol{0} \end{pmatrix}; \qquad \boldsymbol{F} = (\boldsymbol{K}_{\mathrm{PI}}\hat{\boldsymbol{C}} \quad \boldsymbol{K}_{\mathrm{I}})\,,$$

$$\bar{\boldsymbol{A}} = \begin{pmatrix} \hat{\boldsymbol{A}} + \hat{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{K}_{\mathrm{PI}}\hat{\boldsymbol{C}} & \hat{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{K}_{\mathrm{I}} \\ \hat{\boldsymbol{C}} & \boldsymbol{I} \end{pmatrix}$$

umgeformt werden können. Für das unvollständig bekannte System (18) und (19) kann in derselben Weise, wie dies in [6] für kontinuierliche Systeme getan wurde, die hinreichende Stabilitätsbedingung

$$\lambda_{\mathrm{P}}\left(\sum_{i=0}^{\infty} |\boldsymbol{G}_2(i)| \cdot \sum_{i=0}^{\infty} |\bar{\boldsymbol{G}}(i)|\right) < 1 \qquad (20)$$

abgeleitet werden, wobei

$$\bar{\boldsymbol{G}}(0) = \boldsymbol{K}_{\mathrm{PI}}\,,$$

$$\bar{\boldsymbol{G}}(k) = \bar{\boldsymbol{F}}\bar{\boldsymbol{A}}^{k-1}\bar{\boldsymbol{E}} \qquad (k \geqq 1)$$

die Gewichtsfolgematrix des Systems (20) bezüglich Eingang $\boldsymbol{f}$ und Ausgang $\boldsymbol{u}$ darstellt. Vorausgesetzt wurde dabei, daß das System (20) stabil ist.

Die Anwendung dieser Stabilitätsbedingungen geht davon aus, daß eine Matrix

$$\boldsymbol{W}_2 \geqq \sum_{i=0}^{\infty} |\boldsymbol{G}_2(i)| \qquad (21)$$

bestimmt wird, mit der die für die Erfüllung von (20) hinreichende Bedingung

$$\lambda_{\mathrm{P}}\left(\boldsymbol{W}_2 \sum_{i=0}^{\infty} |\bar{\boldsymbol{G}}(i)|\right) < 1 \qquad (22)$$

getestet werden kann. Da für die Übergangsfolge $\boldsymbol{H}_2(k)$ des Fehlermodells (18) die Beziehung

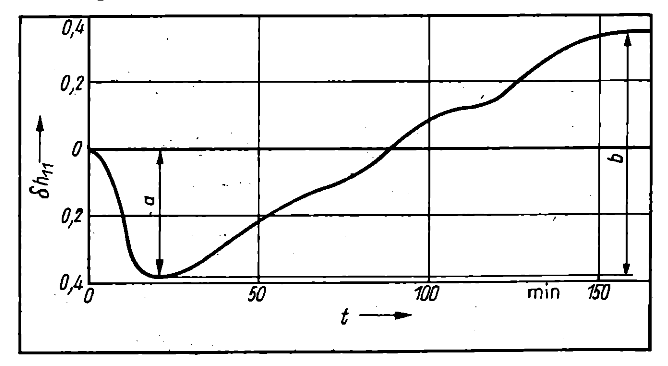
$$\boldsymbol{H}_2(k) = \sum_{i=0}^{k} \boldsymbol{G}_2(i) \qquad (23)$$

gilt, kann $\boldsymbol{W}_2$ aus den Differenzen zwischen den Übergangsfolgen des Näherungsmodells ($\hat{\boldsymbol{H}}(k)$) und der für die unterschiedlichen Betriebsbedingungen erhaltenen Modelle ($\boldsymbol{H}^{(l)}(k)$) bestimmt werden. Nach (21) und (23) muß jedes Element w_{ij} von $\boldsymbol{W}_2$ größer sein als die totale Variation der Fehlerkurve

$$h_{ij}(l) - \hat{h}_{ij} \qquad (l = 1, \dots, q) \qquad \text{(Bild 7)}\,.$$

Bild 7. Differenz $h_{11}^{(8)}(k) - \hat{h}_{11}(k)$ der Übergangsfolgen des Modells für Parametersatz 8 aus der Tafel und des Nominalmodells

Vollständige Variation $= a + b = 1{,}12$



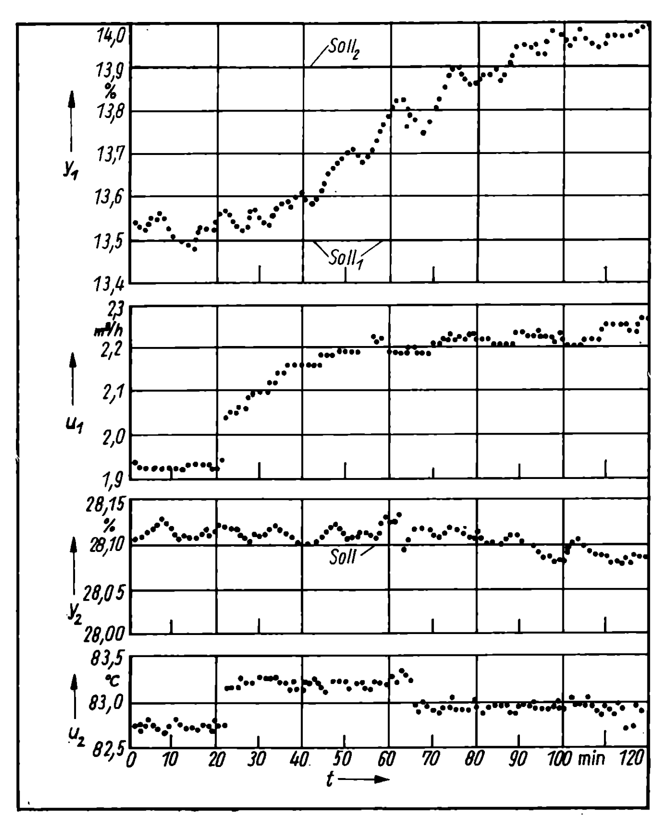


Bild 8. Anlagenverhalten bei Führungssprung der Regelgröße y_1 zum Zeitpunkt $t_0 = 22$ min

Für die AHL-Anlage wurde

$$W_2 = \begin{pmatrix} 1{,}4 & 0{,}02 \\ 0{,}2 & 0{,}04 \end{pmatrix}$$

ermittelt. Das geregelte Näherungsmodell (20) führte mit den o. a. Modell- und Reglerparametern auf

$$\sum_{i=0}^{\infty} \bar{G}(i) = \begin{pmatrix} 0{,}57 & 0{,}205 \\ 1{,}62 & 13{,}7 \end{pmatrix},$$

so daß die linke Seite von (22) den Wert $0{,}48 < 1$ hat. Damit ist bewiesen, daß der Regler (3), (13) und (15) nicht nur mit den für die unterschiedlichen Betriebsfälle ermittelten Modellen, sondern auch mit einer Vielzahl „dazwischen liegender" Modelle zu einem stabilen geschlossenen Kreis führt.
Für die Untersuchung der Dynamikforderungen (III) wird das Übergangsverhalten des geregelten Systems an unterschiedlichen Arbeitspunkten simuliert. Dadurch erhält man einen Überblick über die Veränderungen der Überschwingweite bzw. Einschwingzeit, die durch die Parameteränderungen in der Regelstrecke hervorgerufen werden. Im Gegensatz zum Stabilitätsnachweis, der für alle denkbaren Betriebsfälle geführt wurde, wird die Regelgüte nur stichprobenartig untersucht, weil dies für die praktischen Belange des behandelten Anwendungsfalles ausreichend ist. Bild 6 zeigt, daß auch für das Streckenverhalten mit der kleinsten bzw. größten statischen Verstärkung (kleinste bzw. größte Kreisverstärkung) die Dynamikforderungen (III) erfüllt werden.

5. Experimentelle Erprobung und Anwendung

Voraussetzung für die praktische Realisierung in Form einer rechnergeführten Regelung ist eine zuverlässige Meßwerterfassung über einen Prozeßrechner mit einer angemessenen Datenglättung der benötigten Eingangsmessungen [5] sowie eine stabile Sollwertsteuerung der konventionellen Analogregler. Diese Forderung konnte durch den zusätzlichen Anschluß der AHL-Anlage an einen Prozeßrechner erreicht werden, der bereits seit vielen Jahren für die Überwachung dreier Harnstoffanlagen benutzt wird.
Dieser Prozeßrechner arbeitet mit einer festen Tastzeit von 30 s. Die Regelgrößen (Harnstoff- und Stickstoffkonzentration) werden indirekt über ein Regressionspolynom 1. Ordnung aus den On-line-Messungen „Brechzahl" und „Dichte" ermittelt. Die Realisierung des Reglergesetzes entsprechend (11), (13) und (15) erfolgt mit einer Tastzeit von 2 min, was angesichts der vorhandenen Streckendynamik ausreichend erscheint. Die Sollwerte der Analogregler werden nach dem Prinzip der Impulslängenmodulation im Zyklus von 30 s angesteuert, um eine hohe Einstellgenauigkeit zu erreichen und Gerätefehler erkennen zu können.
Die experimentelle Erprobung zeigte, daß es möglich war, die Güteforderungen (I) bis (III) im praktischen Betrieb zu erfüllen und die Anlage zwischen 70% und 150% ihrer projektierten Leistung stabil zu betreiben. Die Schwankungen der Regelgrößen um die vorgegebenen Sollwerte lagen bei normalen äußeren Störungen mit Sicherheit innerhalb der geforderten Qualitätstoleranzen des Produktes. Die Auswirkungen sprungförmiger Störungen wurden ausreichend schnell abgebaut. Im Bild 8 ist eine typische Führungsübergangsfunktion aus den Experimenten mit der geregelten Anlage dargestellt, wobei auch die gute Entkopplung der beiden Regelgrößen bemerkenswert ist.
Für den praktischen Dauerbetrieb mußten zusätzlich eine Reihe von Sicherheitsmaßnahmen realisiert werden. Dazu gehören

- die automatische Umschaltung auf Handbetrieb bei bestimmten Rechnerfehlern oder Fehlern an Meßgliedern (dafür z. B. Sinnfälligkeitskontrolle aller Eingangssignale und Trendüberwachung für Analysenmessungen)
- die automatische Überwachung der Sollwerteinstellung am Analogregler (z. B. Grenzverletzung, Handeingriff) und Abschaltung eines fehlerhaften Reglers vom Rechner
- die stoßfreie Umschaltung der einzelnen Analogregler von Hand- auf Rechnerbetrieb.

Durch die zusätzliche Implementierung eines einschleifigen Regelalgorithmus für eine unabhängige Prozeßgröße und die automatische Überwachung weiterer Prozeßparameter wurde das eingangs genannte Ziel eines Betriebs der AHL-Anlage ohne zusätzliches Bedienpersonal erreicht. Die Robustheit des gefundenen Mehrgrößenreglers und der dadurch bedingte weite Einstellbereich der Anlagenlast ermöglichen es, die Anlage auch bei kontinuierlichem Betrieb unmittelbar den wechselnden Absatzbedingungen anzupassen.

Zusammenfassung

Am Beispiel einer großtechnischen Anlage zur Herstellung von Flüssigdünger wurde eine Einstellregel für einen zweidimensionalen PI-Mehrgrößenregler erläutert. Dabei wurde zunächst unter ausschließlicher Verwendung von Informationen über die Statik der Strecke nach einem systematischen Verfahren ein Regler entworfen, der noch einige Tuning-Parameter enthält. Die vollständige Festlegung der Reglerparameter erfolgt unter Ausnutzung aller verfügbaren Informationen über die Dynamik der Strecke, wobei in ingenieurtechnisch anschaulicher Weise die Tuning-Parameter zur Erfüllung bestimmter Dynamikforderungen festgelegt werden. Anschließende Robustheitsuntersuchungen sichern die Anwendbarkeit im praktischen Fall, da die Streckeneigenschaften zeitvariabel sind und nur eine schlechte Prozeßkenntnis vorliegt.
Der Beitrag enthält einige Ansätze zur Modellbildung bei sehr stark gestörten Meßwerten, jedoch verdient das Problem der möglichst genauen Beschreibung der sich ergebenden Modellunsicherheiten durchaus weitere Beachtung.

Die Autoren danken Herrn Dr. rer. nat. *J. Fischer* (ZKI Dresden) für seine Unterstützung bei der Auswertung der Meßreihen entsprechend Abschn. 3.

Literatur

[1] *Davison, E. J.*: Multivariable tuning regulators: the feedforward and robust control of a general servomechanism problem. IEEE Trans. AC-21 (1976) 1, pp. 35–47.
[2] *Döring, D.*: Entwurf und Einsatz von PI-Reglern für zeitdiskrete Mehrgrößensysteme. msr, Berlin 28 (1985) 1, S. 16–19.
[3] *Horn, S.; Friedrich, H.-J.*: Anwendung des Prinzips der fehlerfreien Arbeit in der Anlage zur Herstellung von Flüssigdüngemitteln und der 10%-igen Versandkontrolle ohne zusätzliche Arbeitskräfte. Standardisierung und Qualität (1984) 8.
[4] *Jumar, U.; Spietschka, B.; Werner, B.*: Erprobung einer Mehrgrößenregelung für eine Destillationskolonne. msr, Berlin 28 (1985) 7, S. 302–305.
[5] *v. Kurnatowski, B.; Eilemann, G.*: Rechner führt Ammoniakanlage zuverlässiger und mit geringerem Erdgasverbrauch. Rechentechnik/Datenverarbeitung (1981) 7, S. 13–15.
[6] *Lunze, J.*: Entwurf robuster Mehrgrößenregler bei beschränkter Modellunsicherheit. ZKI-Informationen 4/1982.
[7] *Lunze, J.*: Notwendige Modellkenntnisse zum Entwurf robuster Mehrgrößenregler mit I-Charakter. msr, Berlin 25 (1982) 11, S. 608–612.
[8] *Lunze, J.*: Determination of robust multivariable I-Controllers by means of experiments and simulations. System Analysis/Modelling/Simulation 2 (1985) 3, S. 227–249.
[9] *Mohr, W.*: Univariate autoregressive moving-average processes. Würzburg: Physica-Verlag 1976.
[10] *Penttinen, V.; Koivo, H. N.*: Multivariable tuning regulation for unknown systems. Automatica 16 (1980) 4, pp. 393–398.
[11] *Porter, B.*: Design of error-actuated controllers for unknown multivariable plants. Electr. Letters 17 (1981) 3, pp. 106–107.
[12] *Reinisch, K.*: Analyse und Synthese kontinuierlicher Steuerungssysteme. Berlin: VEB Verlag Technik 1979.
[13] *Strejc, V.*: Dimensionierung stetiger linearer Regelkreise für die Praxis. Band 97 der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK. Berlin: VEB Verlag Technik 1970.
[14] *Strobel, H.*: Experimentelle Systemanalyse. Berlin: Akademie-Verlag 1975.

msr 8423

H. Zietz

Abschätzung der oberen Frequenzgrenze für die Stabilitätsanalyse von Mehrgrößenregelungen

0. Einleitung

Diagonaldominante Mehrgrößenregelungen haben für die praktische Prozeßführung besondere Vorteile, da sie übersichtliche Stabilitätsverhältnisse für die Inbetriebnahme und bei Ausfall einzelner (auch mehrerer) Elemente diagonaler Meßglied- und/oder Reglermatrizen haben [1] und [3]. Des weiteren vereinfacht sich der Entwurf der Regelung erheblich, wenn die Mehrgrößenstrecke diagonaldominant ist [2] und [3].
Für experimentell ermittelte Frequenzgangmatrizen bereitet aber die Überprüfung der Diagonaldominanz für höhere Frequenzen Schwierigkeiten, da die praktischen Mehrgrößenstrecken im allgemeinen Tiefpaßcharakter haben und ihre Frequenzgänge für höhere Frequenzen nicht genau bekannt sind. Daher hat der Nachweis, daß bei Strecken mit Tiefpaßcharakter für die Stabilitätsanalyse allgemein und damit auch für diagonaldominante Systeme nur die Kenntnis der Frequenzgänge bis zu einer oberen Frequenzgrenze ω_g erforderlich ist, große praktische Bedeutung. Diese Frequenzgrenze soll abgeschätzt werden.
In der Literatur wurde dieses Problem bisher selten behandelt. Ein wesentlicher Beitrag, auf den im allgemeinen Bezug genommen wird, stammt von *Mee* [4], der für das inverse Nyquist-Verfahren [2] und [3] auf der Basis der Spektralnorm der Frequenzgangmatrix $\boldsymbol{F}_0(j\omega)$ des offenen Systems eine Bedingung für die Abschätzung der oberen Frequenzgrenze ω_g, bis zu der Diagonaldominanz der inversen Streckenmatrix erfüllt sein muß, angegeben hat. Im vorliegenden Beitrag wird nachgewiesen, daß diese Bedingung allgemein, auch für nichtdiagonaldominante Mehrgrößenregelungen, zur Abschätzung der oberen Grenzfrequenz für die Stabilitätsanalyse anwendbar ist. Es wird weiter gezeigt, daß durch Übergang auf die Spaltensummennorm die Abschätzung von ω_g vereinfacht und für diagonaldominante Mehrgrößenregelungen eine Beziehung zwischen ω_g und den Schnittfrequenzen der offenen Eingrößenregelungen angegeben werden kann.

1. Abschätzung der oberen Grenzfrequenz für nichtdiagonaldominante Mehrgrößenregelungen

1.1. *Verallgemeinertes Nyquist-Kriterium*

Im Bild 1 ist die Struktur, die der Betrachtung zugrunde liegt, angegeben. $\boldsymbol{S}(p)$ bezeichnet die Übertragungsfunktionsmatrix der Mehrgrößenstrecke

$$\boldsymbol{x}(p) = \boldsymbol{S}(p) \cdot \boldsymbol{u}(p)\,, \qquad \boldsymbol{S}(p) = (S_{ik}(p))\,, \qquad i, k = 1(1)\,m\,. \tag{1}$$

$\boldsymbol{R}(p)$ stellt die Reglermatrix dar. Alle Elemente von $\boldsymbol{S}(p)$ sollen für $|p| \to \infty$ im Betrag gegen Null streben (streng proper) und alle Elemente von $\boldsymbol{R}(p)$ für $|p| \to \infty$ im Betrag unter einer endlichen Schranke bleiben (proper). $\boldsymbol{I}$ ist die Einheitsmatrix.
Für das geregelte System ergibt sich aus Bild 1

$$\left.\begin{aligned} \boldsymbol{x}(p) &= \boldsymbol{F}_w(p) \cdot \boldsymbol{w}(p)\,, \\ \boldsymbol{F}_w(p) &= (\boldsymbol{I} + \boldsymbol{S}(p) \cdot \boldsymbol{R}(p))^{-1} \cdot \boldsymbol{S}(p)\,\boldsymbol{R}(p)\,. \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

Über die Stabilität der Regelung gibt im Frequenzbereich die Determinante der Rückführdifferenzmatrix $\boldsymbol{F}$ Auskunft

$$\boldsymbol{F}(p) = \boldsymbol{I} + \boldsymbol{F}_0(p)\,, \tag{3a}$$

$$\boldsymbol{F}_0(p) = \boldsymbol{S}(p) \cdot \boldsymbol{R}(p)\,, \tag{3b}$$

$$\det \boldsymbol{F}(p) = P_g(p)/P_0(p)\,. \tag{4}$$

$P_g(p)$ charakteristisches Polynom des geschlossenen Systems;
$P_0(p)$ charakteristisches Polynom des offenen Systems

Satz 1:

Nach dem Argumentprinzip ist das geregelte Mehrgrößensystem stabil, wenn die Abbildung einer vorgegebenen Nyquist-Kurve D durch $\det \boldsymbol{F}(p)$ den Ursprung der komplexen Ebene n_0-mal im Gegenuhrzeigersinn umschließt, falls $p\,D$ einmal im Uhrzeigersinn durchläuft [2] und [3]

$$n_f = -n_0\,. \tag{5}$$

Die Autorenkurzvorstellung von Doz. Dr.-sc. techn. *H. Zietz* erfolgt im Zusammenhang mit der Vorstellung seiner Dissertation B auf S. 44.

Dabei bezeichnet n_0 die Anzahl der Pole von $\boldsymbol{F}_0(p)$ (und $\boldsymbol{F}(p)$) in der geschlossenen rechten Halbebene. Die Nyquist-Kurve wird allgemein als Halbkreis in der rechten Halbebene vorgegeben, dessen Radius so groß zu wählen ist, daß alle endlichen Nullstellen von $P_0(p)$ und $P_g(p)$ enthalten sind. Bei unendlichem Radius geht die Nyquist-Kurve in die imaginäre Achse über ($p = j\omega$, $-\infty < \omega < +\infty$), wobei sich die Berechnung der Abbildung vereinfacht.

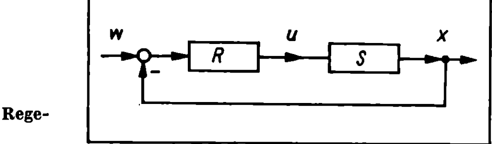


Bild 1. Struktur der Regelung

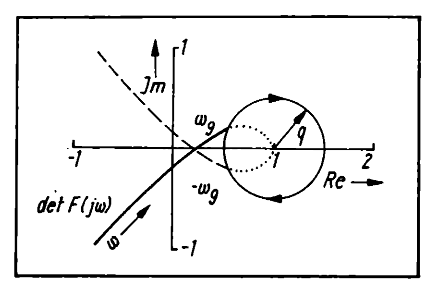


Bild 2. Abschätzung der oberen Grenzfrequenz anhand der Ortskurve von det $\boldsymbol{F}(j\omega)$

1.2. *Abschätzung der oberen Grenzfrequenz für nichtdiagonaldominante Mehrgrößenregelungen*

Nach Voraussetzung streben für $\omega \to \infty$ alle Elemente der Streckenmatrix $\boldsymbol{S}(j\omega)$ nach Null und alle Elemente von $\boldsymbol{R}(j\omega)$ bleiben im Betrag beschränkt. Nach (3b) nehmen dann auch alle Elemente von $\boldsymbol{F}_0(j\omega)$ für $\omega \to \infty$ den Wert Null an.
Unter diesen Voraussetzungen gilt:

Satz 2:

Für die Stabilitätsanalyse der Mehrgrößenregelung auf der Basis der Rückführdifferenzmatrix $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{I} + \boldsymbol{F}_0$ ist der Frequenzbereich $-\omega_g \leqq \omega \leqq +\omega_g$ entscheidend, wobei die Grenzfrequenz ω_g bestimmt ist durch

$$||\boldsymbol{F}_0(j\omega)|| \leqq q < 1 \quad \text{für} \quad |\omega| \geqq \omega_g\,. \tag{6}$$

$||...||$ Spektralnorm bzw. Zeilen- oder Spaltensummennorm

Satz 3:

Eine Mehrgrößenregelung ist stabil, wenn $n_F = -n_0$ ist, wobei n_F die Anzahl der Umschlingungen des Koordinatenursprungs durch die Ortskurve $\det \boldsymbol{F}(j\omega)$ für $-\omega_g \leqq \omega \leqq +\omega_g$, die für $|\omega| \geqq \omega_g$ durch einen Kreis mit dem Radius $q < 1$ um den Punkt $+1, j0$ gemäß Bild 2 zu schließen ist, beschreibt.

Beweis:

Nach Voraussetzung nehmen alle Elemente von $\boldsymbol{F}_0(j\omega)$ für $\omega \to \infty$ den Wert Null an. Dementsprechend strebt $\det \boldsymbol{F}(j\omega)$ nach (3a) für $\omega \to \infty$ gegen den Wert 1.
Offensichtlich kann sich die Anzahl der Umschlingungen des Koordinatenursprungs durch $\det \boldsymbol{F}(j\omega)$ nicht mehr ändern, wenn $\det \boldsymbol{F}(j\omega)$ (Bild 2) in einen Kreis mit dem Radius $q < 1$ um den Punkt $+1, j0$ der komplexen Ebene eintaucht und ihn nicht wieder verläßt. Damit ergibt sich zur Bestimmung von ω_g

$$|\det \boldsymbol{F}(j\omega) - 1| \leqq q < 1 \quad \text{für} \quad |\omega| \geqq \omega_g\,. \tag{7}$$

Mit Hilfe der charakteristischen Übertragungsfunktionen $f_k(j\omega)$ der Matrix $\boldsymbol{F}(j\omega)$ bzw. $f_{0k}(j\omega)$ der Matrix $\boldsymbol{F}_0(j\omega)$ läßt sich die Bedingung (7) auf die Matrix des offenen Systems übertragen und die Abschätzung von ω_g vereinfachen.
Für die charakteristischen Übertragungsfunktionen (frequenzabhängige Eigenwerte) der Matrix $\boldsymbol{F}(j\omega)$ bzw. $\boldsymbol{F}_0(j\omega)$ gelten die Beziehungen [1] und [3]

$$\det \boldsymbol{F}(j\omega) = \prod_k f_k(j\omega)\,, \qquad k = 1(1)\,m; \tag{8}$$

$$\det \boldsymbol{F}_0(j\omega) = \prod_k f_{0k}(j\omega)\,, \qquad k = 1(1)\,m; \tag{9}$$

$$f_k(j\omega) = 1 + f_{0k}(j\omega)\,, \qquad k = 1(1)\,m\,. \tag{10}$$

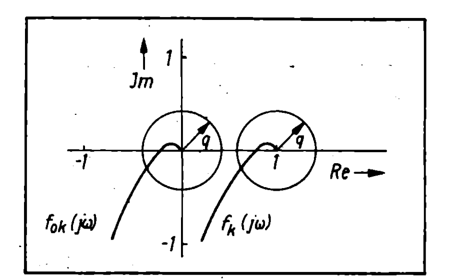


Bild 3. Abschätzung der oberen Grenzfrequenz anhand der charakteristischen Ortskurven

Zunächst wird die Bedingung (7) auf die charakteristischen Übertragungsfunktionen von $\boldsymbol{F}(j\omega)$ übertragen und dann mit Hilfe der Beziehung (10) der Übergang zu $\boldsymbol{F}_0(j\omega)$ vollzogen.
Damit sich an der Anzahl der Umschlingungen des Koordinatenursprungs durch det $\boldsymbol{F}(j\omega)$ für $|\omega| \geqq \omega_g$ nichts mehr ändert, ist nach dem Argumentprinzip notwendig und hinreichend, daß keine der charakteristischen Ortskurven $f_k(j\omega)$, $k = 1(1)\,m$, für $|\omega| \geqq \omega_g$ den Koordinatenursprung umfassen kann. Diese Bedingung ist offensichtlich erfüllt, wenn alle charakteristischen Ortskurven $f_k(j\omega)$ für $|\omega| \geqq \omega_g$ innerhalb eines Kreises mit dem Radius $q < 1$ um den Punkt $+1, j0$ bleiben.
Beim Übergang von $f_k(j\omega)$ zu $f_{ok}(j\omega)$ gemäß (10) geht der Koordinatenursprung in den kritischen Punkt $-1, j0$ für das offene System über. Folglich kann sich an der Anzahl der Umschlingungen des Koordinatenursprungs durch det $\boldsymbol{F}(j\omega)$ nichts mehr ändern, wenn alle Ortskurven $f_{ok}(j\omega)$ für $|\omega| \geqq \omega_g$ den kritischen Punkt $-1, j0$ nicht mehr umfassen. Das ist offensichtlich erfüllt, wenn alle Ortskurven $f_{ok}(j\omega)$ für $|\omega| \geqq \omega_g$ innerhalb eines Kreises mit dem Radius $q < 1$ um den Koordinatenursprung liegen (Bild 3). Dafür ist notwendig und hinreichend, daß der größte frequenzabhängige Eigenwert $f_{ok}(j\omega)$ für $|\omega| \geqq \omega_g$ innerhalb des Kreises $q < 1$ um den Koordinatenursprung liegt. Daraus folgt

$$\max_k |f_{ok}(j\omega)| \leqq q < 1 \quad \text{für} \quad |\omega| \geqq \omega_g\,, \qquad k = 1(1)\,m\,. \tag{11}$$

Der Betrag des größten Eigenwertes von $\boldsymbol{F}_0(j\omega)$ ist aber nichts anderes als die Spektralnorm $\|\boldsymbol{F}_0(j\omega)\|_2$ [5]. Damit gilt

$$\max_k |f_{ok}(j\omega)| = \|\boldsymbol{F}_0(j\omega)\|_2 \leqq q < 1 \quad \text{für} \quad |\omega| \geqq \omega_g\,. \tag{12}$$

Diese Bedingung wurde von *Mee* [4] auf anderem Wege mit Bezug auf das inverse Nyquist-Verfahren zur Abschätzung des Frequenzbereiches $|\omega| \leqq \omega_g$ angegeben, in dem die Diagonaldominanz der inversen Streckenmatrix erfüllt sein muß.
Hiermit ist nachgewiesen, daß mit dem so bestimmten ω_g allgemein der wesentliche Frequenzbereich für die Stabilitätsanalyse erfaßt wird.

2. Abschätzung der Frequenzgrenze ω_g für diagonaldominante Mehrgrößenregelungen

2.1. *Verallgemeinertes Nyquist-Kriterium für diagonaldominante Mehrgrößenregelungen*

In diesem Abschnitt wird auf das direkte Nyquist-Verfahren zum Entwurf diagonaldominanter Mehrgrößenregelungen Bezug genommen [2] [3] [6] [7] und [9], das auf der Diagonaldominanz der Rückführdifferenzmatrix $\boldsymbol{F}(j\omega)$ aufbaut. Nach (3a) und (3b) gilt

$$\left.\begin{aligned} &|1 + F_{okk}(j\omega)| > \sum_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{m} |F_{oik}(j\omega)|\,, \\ &k = 1(1)\,m\,, \qquad 0 \leqq \omega < \infty\,. \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

Bei Diagonaldominanz vereinfacht sich die Stabilitätsanalyse der Mehrgrößenregelung erheblich.

Satz 4:
Bei diagonaldominanter Rückführdifferenzmatrix wird die Anzahl der Umschlingungen des Koordinatenursprungs durch det $\boldsymbol{F}(j\omega)$ für $-\infty < \omega < +\infty$ allein durch die Hauptdiagonalelemente $F_{kk}(j\omega) = 1 + F_{okk}(j\omega)$ bestimmt [2] und [3].

$$n_F = \Sigma n_k = -n_0\,. \tag{14}$$

Dabei ist n_k die Anzahl der Umschlingungen des Koordinatenursprungs durch $F_{kk}(j\omega)$ bzw. des kritischen Punktes $-1, j0$ durch $F_{okk}(j\omega)$.

2.2. *Abschätzung der Frequenzgrenze ω_g auf der Basis der Spaltendiagonaldominanz*

Nach Voraussetzung fallen alle Elemente von $\boldsymbol{F}_0(j\omega)$ für $\omega \to \infty$ im Betrag auf Null ab.

Wenn die Spaltensumme $\sum_{i=1}^{m} |F_{oik}(j\omega)|$ für ein bestimmtes k mit steigender Frequenz bei $\omega = \omega_{gk}$ unter 1 abgefallen ist und nicht wieder auf 1 oder darüber ansteigt, kann für diese Spalte mit Bezug auf (13) folgende Abschätzung vorgenommen werden

$$\left.\begin{aligned} &|1 + F_{okk}(j\omega)| \geqq 1 - |F_{okk}(j\omega)| > \sum_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{m} |F_{oik}(j\omega)|\,, \\ &|\omega| \geqq \omega_{gk}\,. \end{aligned}\right\} \tag{15}$$

Aus (15) folgt, daß Diagonaldominanz für die betreffende Spalte der Rückführdifferenzmatrix immer erfüllt ist, wenn

$$\sum_{i=1}^{m} |F_{oik}(j\omega)| \leqq q < 1\,, \qquad |\omega| \geqq \omega_{gk}\,. \tag{16}$$

Da nach (16) auch $|F_{okk}(j\omega)| < 1$ ist, kann die Ortskurve $F_{okk}(j\omega)$ den kritischen Punkt $-1, j0$ für $|\omega| \geqq \omega_g$ nicht mehr umfassen und n_k sich nicht mehr ändern, d. h., das Hauptdiagonalelement $F_{okk}(j\omega)$ hat für $|\omega| \geqq \omega_{gk}$ keinen Einfluß mehr auf die Stabilität der Mehrgrößenregelung. Die Bedingung (16) stellt somit eine Grundlage für die Bestimmung der oberen Grenzfrequenz ω_{gk} für die k-te Spalte dar.
Für das Gesamtsystem gilt als obere Grenzfrequenz ω_g die Frequenz, bei der alle Spalten, auch die größte Spaltensumme, die Bedingung (16) erfüllen. Daraus folgt für die Bestimmung von ω_g

$$\max_k \sum_{i=1}^{m} |F_{oik}(j\omega)| \leqq q < 1\,, \qquad k = 1(1)\,m\,. \tag{17}$$

Die linke Seite dieser Bedingung enthält die Spaltensummennorm. Sie ist der Spektralnorm in (12) äquivalent, denn die Zeilen- und Spaltensummennorm stellen nach dem Gershgorin-Theorem eine obere Schranke für den Betrag des größten Eigenwertes dar [8]

$$\max_k |f_{ok}(j\omega)| \leqq \max_k \sum_{i=1}^{m} |F_{oik}(j\omega)|\,, \qquad k = 1(1)\,m\,. \tag{18}$$

Folglich liegt man bei der Bestimmung von ω_g auf der sicheren Seite, wenn man in (12) anstelle von $\|\boldsymbol{F}_0(j\omega)\|_2$ die Zeilen- oder Spaltensummennorm einsetzt. Die Bedingung (17) gilt somit allgemein, auch für Mehrgrößensysteme, bei denen $\boldsymbol{F}(j\omega)$ für $|\omega| < \omega_g$ nicht diagonaldominant ist, denn die Abschätzung beruht darauf, daß $\boldsymbol{F}(j\omega)$ für $|\omega| \geqq \omega_g$ generell diagonaldominant ist (vgl. (15) und (16)).
Für den Entwurf von Mehrgrößenregelungen nach dem direkten Nyquist-Verfahren beschreibt ω_g die obere Frequenzgrenze, bis zu der schmale Gershgorin-Bänder, mindestens aber Diagonaldominanz von $\boldsymbol{F}_0(j\omega)$ wünschenswert erscheinen. Dabei muß diese Forderung für die einzelnen Spalten nur bis zur Frequenz ω_{gk} gemäß (16) erfüllt werden, was ihre praktische Realisierung unter Umständen erleichtert.
Mit Bezug auf die Grenzfrequenzen ω_{gk} läßt sich die Stabilitätsanalyse diagonaldominanter Mehrgrößenregelungen in folgender Weise vereinfachen:

Satz 5:
Bei diagonaldominanter Rückführdifferenzmatrix $\boldsymbol{F}(j\omega)$ wird die Anzahl der Umschlingungen des Koordinatenursprungs durch det $\boldsymbol{F}(j\omega)$ für $-\infty < \omega < +\infty$ allein durch die Hauptdiagonalelemente $F_{kk}(j\omega) = 1 + F_{okk}(j\omega)$ nach (14) bestimmt. Dabei ist n_k die Anzahl der Umschlingungen des kritischen Punktes $-1, j0$ durch das Gershgorin-Band der Ortskurve $F_{okk}(j\omega)$ für $-\omega_{gk} < \omega < \omega_{gk}$, $k = 1(1)\,m$, das für $|\omega| \geqq \omega_{gk}$ durch einen Kreis mit dem Radius $q < 1$ um den Koordinatenursprung gemäß Bild 4 zu schließen ist.

2.3. *Bestimmung von ω_{gk} und ω_g*

Zunächst wird eine untere Schranke für ω_{gk} angegeben. Es zeigt sich, daß die Schnittfrequenz ω_{sk} des Amplitudenganges $F_{okk}(j\omega)$ mit der Linie $F_{okk} = 1$ (0-dB-Linie im Bode-Diagramm) dafür gut geeignet ist. Unter der Voraussetzung, daß die Amplituden-

Bild 4. Abschätzung der oberen Grenzfrequenz anhand der Gershgorin-Bänder der Diagonalelemente

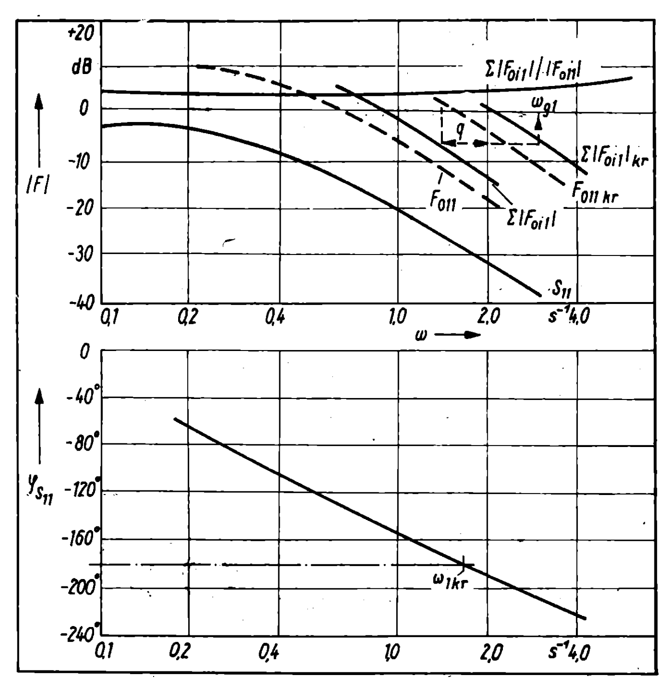


Bild 5. Bestimmung der Grenzfrequenz ω_{g1} im Bode-Diagramm

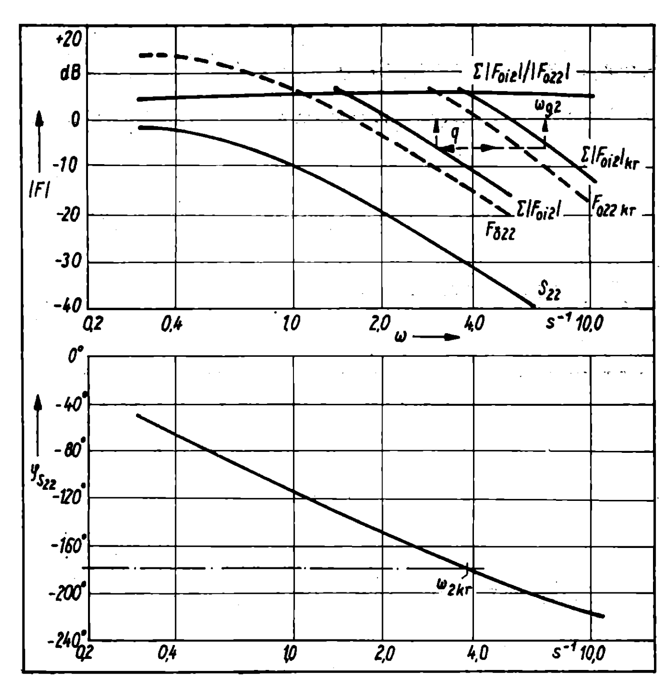


Bild 6. Bestimmung der Grenzfrequenz ω_{g2} im Bode-Diagramm

gänge $F_{okk}(j\omega)$ für $\omega \geqq \omega_{sk}$ mit steigender Frequenz monoton fallen, gilt

$$\omega_{gk} > \omega_{sk}\,, \qquad \omega_g > \omega_{s\,max} = \max_k \omega_{sk}\,, \qquad k = 1(1)\,m\,. \tag{19}$$

Beweis:

$\omega_{gk} = \omega_{sk}$ kann sich nach (16) nur für $q = 1$ und $\sum_{\substack{i=1\\i\neq k}}^{m} |F_{oik}(j\omega)| = r_k(\omega) = 0$ ergeben. Wenn dagegen $q < 1$ und $r_k(\omega) \geqq 0$ ist, muß nach Voraussetzung $\omega_{gk} > \omega_{sk}$ sein, und nach (17) folgt $\omega_g > \omega_{s\,max}$.

Mit ω_{sk} als Ausgangspunkt läßt sich mit wenigen Frequenzwerten $\omega_i = 2^i\omega_{sk}$ ($i = 1, 2, \ldots$) der Wert $\omega = \omega_{gk}$ ermitteln, bei der die Bedingung (16) erfüllt wird.

Hat man auf diesem Wege für alle Spalten $k = 1(1)m$ ω_{gk} ermittelt, ergibt sich

$$\omega_g = \max_k \omega_{gk}\,. \tag{20}$$

Wenn nur die Frequenzgrenze ω_g von Interesse ist, kann man die Prozedur bei $\omega_{s\,max}$ beginnen und prüfen, wann die Bedingung (17) erfüllt ist.

3. Beispiel

Als einfaches Beispiel wird eine Zweigrößenstrecke vorgegeben, um die Anwendung der Methode zu zeigen und auf Probleme der Bestimmung von ω_g hinzuweisen. Die Elemente der Übertragungsfunktionsmatrix der Strecke lauten:

$$S_{11}(j\omega) = \frac{1}{(1 + 4j\omega)\,(1 + 2j\omega)\,(1 + 0{,}3j\omega)}$$

$$S_{12}(j\omega) = \frac{0{,}6}{(1 + 2j\omega)\,(1 + j\omega)\,(1 + 0{,}02j\omega)}$$

$$S_{21}(j\omega) = \frac{0{,}7}{(1 + 4j\omega)\,(1 + 2j\omega)\,(1 + 0{,}1j\omega)}$$

$$S_{22}(j\omega) = \frac{1}{(1 + 2j\omega)\,(1 + j\omega)(1 + 0{,}1j\omega)}\,.$$

Die grundsätzliche Schwierigkeit bei der Bestimmung von ω_g besteht darin, daß für den Entwurf der Regelung nur die Strecke vorgegeben ist, zur Ermittlung von ω_g aber $\boldsymbol{F}_0 = \boldsymbol{S} \cdot \boldsymbol{R}$ benötigt wird. Daher wird am Anfang eine möglichst einfache Reglerstruktur und Einstellung gewählt, die eine Frequenzgrenze ω_g ergibt, die mit großer Wahrscheinlichkeit bei der endgültigen Reglerstruktur und Einstellung nicht überschritten wird. Dazu werden im einfachsten Fall ($\boldsymbol{R}$ = diag (K_1, K_2)) P-Regler an den Hauptstrecken auf die Stabilitätsgrenze eingestellt. In den Bildern 5 und 6 sind Amplituden- und Phasengang von S_{11} und S_{22} dargestellt. Für $\varphi_{S_{11}} = \varphi_{S_{22}} = -180°$ ergibt sich $\omega_{1kr} = 1{,}6\ s^{-1}$ und $\omega_{2kr} = 4\ s^{-1}$. Die zugehörigen Reglerverstärkungen betragen $K_{1kr} = 24$ und $K_{2kr} = 35$. Damit erhält man die angedeuteten Amplitudengänge F_{o1kr} und F_{o2kr}. Zur Abschätzung der Diagonaldominanz sind $\Sigma|F_{oik}|/|F_{okk}|$ für $k = 1, 2$ eingetragen, die unabhängig von K_1 und K_2 sind. Wie man aus den Bildern 5 und 6 erkennt, ist die Zweigrößenstrecke bis oberhalb der kritischen Frequenz der Eingrößensysteme diagonaldominant ($\Sigma\,|F_{oik}|/|F_{okk}| < 2 \mathrel{\hat{=}} 6$ dB), für höhere Frequenzen hingegen nicht mehr. Zur Ermittlung der Grenzfrequenzen ω_{g1} und ω_{g2} sind die Spaltensummen $\Sigma\,|F_{oi1}|$ und $\Sigma\,|F_{oi2}|$ eingetragen. Für $q = 0{,}5$ ergibt sich $\omega_{g1} = 3\ s^{-1}$ und $\omega_{g2} = 7\ s^{-1}$.

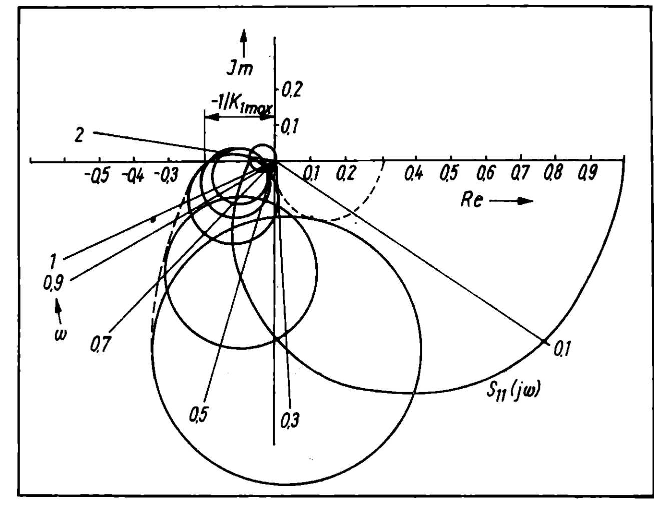
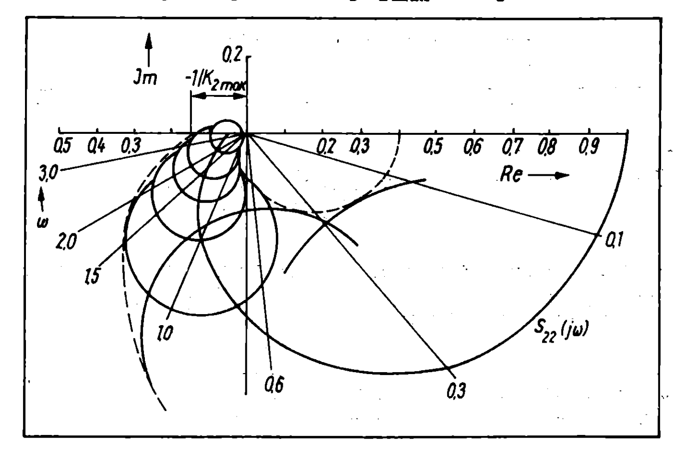


Bild 7. Ermittlung der Reglerverstärkung $K_{1\,max}$ für Diagonaldominanz

Bild 8. Ermittlung der Reglerverstärkung $K_{2\,max}$ für Diagonaldominanz



Zur Bestimmung der Reglerverstärkungen, bei der $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{I} + \boldsymbol{SR}$ diagonaldominant ist [3] und [9], sind in den Bildern 7 und 8 die Ortskurven $S_{11}(j\omega)$ und $S_{22}(j\omega)$ mit ihren Gershgorin-Bändern dargestellt.
Aus ihnen kann man ablesen:

$$-1/K_{1\,\max} = -0{,}2\,, \qquad K_{1\,\max} = 5;$$
$$-1/K_{2\,\max} = -0{,}15\,, \qquad K_{2\,\max} = 6{,}67$$

Mit diesen Reglerverstärkungen ergeben sich die Amplitudengänge $\Sigma\,|F_{\text{oi}1}|$ und $\Sigma\,|F_{\text{oi}2}|$ sowie die zugehörigen Grenzfrequenzen $\omega_{g1} = 1{,}4\ \text{s}^{-1}$ und $\omega_{g2} = 3{,}0\ \text{s}^{-1}$.
Aus den Bildern 7 und 8 ist zu erkennen, daß die Gershgorin-Kreise für $\omega \geqq \omega_{gk}$ den Grenzwert $-1/K_{k\,\max}$ $(k = 1, 2)$ nicht mehr beeinflussen, womit die Gültigkeit der Abschätzung bestätigt wird. Die Einstellung der einschleifigen Kreise auf den Stabilitätsrand zur Bestimmung von ω_{gk} wurde gewählt, weil K_{kkr} den Grenzwert $K_{k\,\max}$, $k = 1(1)\ m$, nach dem direkten Nyquist-Verfahren für

$$\sum_{\substack{i=1\\ i\neq k}}^{m} |F_{\text{oik}}| = 0$$

darstellt. Damit ergibt diese Einstellung einen Grenzwert für ω_{gk}, der von P- und PI-Reglern bei beliebiger Stärke der Kopplung nicht überschritten wird. Lediglich bei Reglern mit D-Anteil ist mit einer etwa 3fach höheren Frequenz ω_{kr} und entsprechend vergrößertem ω_{gk} zu rechnen. Diesen Einfluß kann man durch entsprechend kleinere Vorgabe der Grenze q für die Spaltensumme (16) bzw. Spaltensummennorm (17) berücksichtigen. Wenn diese Notwendigkeit nicht vorliegt, ist $q = 0{,}9$, in jedem Fall aber $q = 0{,}5$, als Vorgabe für die Abschätzung von ω_{gk} und ω_g hinreichend.

Zusammenfassung

Es wurde gezeigt, daß $\|\boldsymbol{F}_0(j\omega)\|_2 \leqq q < 1$ eine allgemeine Bedingung zur Bestimmung der oberen Frequenzgrenze ω_g für die Stabilitätsanalyse von Mehrgrößenregelungen darstellt. Über die Spaltendiagonaldominanz von $\boldsymbol{F}(j\omega) = \boldsymbol{I} + \boldsymbol{F}_0$ wurde die Spaltensummennorm eingeführt und dargelegt, daß für die einzelnen Spalten differenzierte Frequenzgrenzen ω_{gk}, $k = 1(1)m$, angegeben werden können, die in direkter Beziehung zu den Schnittfrequenzen der Hauptdiagonalelemente $F_{\text{okk}}(j\omega)$ stehen. Über diese Beziehung lassen sich die Größenordnungen von ω_{gk} und ω_g abschätzen und ihre Bestimmung vereinfachen. Die Abschätzung der oberen Grenzfrequenz von Mehrgrößenregelungen hat sowohl für die experimentelle Prozeßanalyse als auch für die Bestimmung der Gershgorin-Bänder und systematische Diagonalisierungsverfahren beim Entwurf diagonaldominanter Mehrgrößenregelungen praktische Bedeutung.

Literatur

[1] *MacFarlane, A. G. J.; Belletrutti, J. J.:* The characteristic locus design method. Automatica 9 (1973), pp. 575–588.
[2] *Rosenbrock, H. H.:* Computer-aided control system design. London/New York: Academic Press 1974.
[3] *Korn, U.; Wilfert, H.-H.:* Mehrgrößenregelungen. Berlin: VEB Verlag Technik 1982.
[4] *Mee, D. H.:* Specifications and criteria for multivariable control system design. Proc. Joint Automatic Conference, West Lafayette 1976, pp. 627 to 633.
[5] *Collatz, L.:* Funktionalanalysis und numerische Mathematik. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1968.
[6] *Kuon, J. P.:* Multivariable frequency-domain design techniques. Ph. D. thesis, University Alberta/Canada 1975.
[7] *Fisher, D. G.; Kuon, J. P.:* Comparison and experimental evaluation of multivariable frequency-domain design techniques. Preprints 4. IFAC Symposium "Multivariable Technological Systems". Fredericton/Canada 1977, pp. 453–462.
[8] *Schwarz, H. R.; Rutishauser, H.; Stiefel, E.:* Numerik symmetrischer Matrizen. Leipzig: BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft 1968.
[9] *Zietz, H.:* Untersuchung von Mehrgrößensystemen auf der Basis der Eingangs-Ausgangs-Beziehungen – strukturelle und quantitative Kopplungsanalyse, Dekomposition und optimale Entkopplung. Dissertation B, TH Magdeburg 1985.

msr 8552

V. Müller; A. Dittrich

Digitale Drehzahlregelung von stromrichtergespeisten Gleichstromantrieben[1)]

0. Einleitung

Durch die breite Einführung der Mikroelektronik auch in den Bereich der elektrischen Antriebstechnik erlangen die digitalen Regler für Strom, Spannung, Drehzahl und Lage immer mehr Bedeutung. Für den Reglerentwurf sind neben der quasikontinuierlichen Beschreibung des digitalen Regelkreises bei besonders hohen dynamischen Anforderungen Optimierungsverfahren auf endliche Einstellzeit (Dead-beat-Verhalten) u. ä. auf der Grundlage diskreter Übertragungsfunktionen üblich. Zu diesem Thema existieren bereits eine Vielzahl von Veröffentlichungen (z. B. [1] bis [4]).
Der vorliegende Beitrag befaßt sich daher mit einigen Problemen der digitalen Drehzahlregelung von Gleichstromantrieben, die sich beim praktischen Einsatz hochdynamischer Regler ergeben. Besondere Beachtung finden dabei das Zusammenwirken von Drehzahlregelung und unterlagerter Ankerstromregelung, die Regeldynamik, die stationäre Laufruhe bzw. das Störverhalten sowie die Parameterempfindlichkeit. Die praktischen Messungen wurden an einem durchgehend digital geregelten Gleichstromantrieb mittlerer Leistung ($P_N = 22$ kW) und einem Mikrorechnersystem auf der Basis des U 880 mit Arithmetikzusatz (Arithmetikprozessor U 8032) durchgeführt.

1. Struktur des Drehzahlregelkreises

Für die betrachtete Leistungsklasse der Motoren hat sich das Stromleitverfahren allgemein durchgesetzt. Diese Kaskadenregelung bietet die bekannten Vorteile, wie Übersichtlichkeit und einfache Inbetriebnahme, durch Einzeloptimierung der Regelkreise. Bedeutsame Funktionen erfüllt der Stromregelkreis mit dem Ausgleich von Struktur- und Parameteränderungen der Stromregelstrecke (besonders beim Übergang vom nichtlückenden Strombereich in den Lückbereich und umgekehrt) sowie der Gewährleistung einer hohen Dynamik der Drehmomentumkehr durch Änderung der Stromrichtung auf der Gleichstromseite (Reversieren). Als Stellglied findet ein kreisstromfreier netzgelöschter Umkehrstromrichter in 6-Puls-Brückenschaltung Verwendung. Ansteuerung und Stromregelung arbeiten netzsynchron und entsprechend der Pulszahl des Stromrichters mit einer Abtastzeit von 20 ms/6 = 3,3 ms.
Die arbeitspunktabhängigen Übertragungseigenschaften des Stromrichterstellgliedes lassen sich für das Kleinsignalverhalten im geschlossenen Stromregelkreis annähernd durch die zündsynchrone Strommessung nach [5] kompensieren. Mit dieser Meßmethode ist es möglich, einen Stromregler mit minimaler endlicher Einstellzeit („harter" Dead-beat-Regler) so zu entwerfen, daß der gemessene Stromistwert dem Stromsollwert um zwei Abtastperioden verzögert folgt.
Aufgrund dieser hochdynamischen Stromregelung wird der geschlossene Stromregelkreis durch ein Totzeitglied von einer Abtastperiode bezüglich der Drehzahlregelung approximiert, d. h. $G_{gi} = e^{-pT}$. Dieses Modell kommt dem Bestreben entgegen, im überlagerten Drehzahlregelkreis einen Regler mit einfacher Struktur einzusetzen.
Diese Beschreibung gilt nicht für die Stromrichtungsumkehr, da wegen des Umsteuervorganges und der stromlosen Pause bei der Brückenumschaltung wesentliche Dynamikverluste innerhalb des Stromregelkreises auftreten (Bild 1), so daß sich in diesem Fall zur Anpassung des Drehzahlreglers spezielle regelungstechnische Eingriffe erforderlich machen (s. Abschn. 3.). Die Drehzahlregelstrecke läßt sich bei starrer Kopplung zwischen Antriebsmaschine und Last (Einmassensystem) und Berücksichtigung eines drehzahlproportionalen Anteils des Widerstandsmoments durch ein PT_1-Glied i. allg. hinreichend genau beschreiben (Bild 2).
Die Drehzahlmessung erfolgt im einfachsten Fall asynchron bezüglich der Stromregelung mit einer durch programmierbare

---

Dr.-Ing. *Volkmar Müller* (29) studierte von 1978 bis 1983 an der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden. Seither dort Forschungsstudent im Wissenschaftsbereich Elektrische Automatisierungstechnik.

Dipl.-Ing. *Andreas Dittrich* (27) studierte von 1980 bis 1985 an der Sektion Elektrotechnik der TU Dresden. Seither dort Forschungsstudent im Wissenschaftsbereich Elektrische Automatisierungstechnik.

1) Die dem Beitrag zugrunde liegenden Forschungsarbeiten wurden im Auftrag des VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin durchgeführt.

Zähler vorgegebenen quarzgenauen Meßzeit von 6 ms (integrierendes Meßglied in der Rückführung des Signalflußplanes im Bild 2). Der große Vorteil dieser Meßmethode besteht darin, daß der gemessene Drehzahlistwert bei Verwendung eines inkrementalen Gebers (IGR) entsprechender Strichzahl (2500 Striche je Umdrehung) und Impulsvervierfachung durch das Meßglied direkt in $\min^{-1}$ zur Verfügung steht. Damit kein Meßwert „verloren" geht, muß automatisch auch der Drehzahlregelalgorithmus asynchron zur Stromregelung arbeiten. Hier offenbart sich ein wesentlicher Nachteil für die angestrebte hochdynamische Lösung, da asynchron arbeitende Abtastregelkreise regelungstechnisch schwerer zu beherrschen sind. Eine netzsynchron arbeitende Drehzahlmessung setzt allerdings die Kenntnis der Periodendauer des speisenden Drehstromnetzes sowie die laufende Umrechnung der Drehzahlmeßwerte voraus. Das verursacht in Mikrorechnersystemen ohne Arithmetikhilfe eine erhebliche Mehrbelastung im zeitkritischen Programmteil. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf synchron arbeitende Regelkreise.

Für die Übertragungsfunktion der Regelstrecke (mit Meßglied) im z-Bereich ergibt sich nach Bild 2:

$$G_s(z^{-1}) = (1 - z^{-1})^2 \frac{V_s}{T} \, Z\left\{L^{-1}\left\{\frac{1/T_s}{p^2(p + 1/T_s)}\right\}\right\} z^{-1} \tag{1}$$

und damit

$$G_s(z^{-1}) = \frac{b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 - a z^{-1}} z^{-1} \tag{2}$$

mit

$$b_1 = V_s\left(1 - \frac{T_s}{T} + \frac{T_s}{T} e^{-T/T_s}\right),$$

$$b_2 = V_s\left(\frac{T_s}{T} - e^{-T/T_s} - \frac{T_s}{T} e^{-T/T_s}\right),$$

$$a = e^{-T/T_s}.$$

Eine Vereinfachung der Übertragungsfunktion (2) ist wünschenswert, da die beiden Zählerparameter b_1 und b_2 einen wesentlich höheren numerischen Aufwand für die Berechnung des Drehzahlreglers nach sich ziehen, als es bei einem Parameter der Fall wäre. Mit der Näherung der e-Funktion über die Reihenentwicklung

$$e^{-T/T_s} \approx 1 - \frac{T}{T_s} + \frac{T^2}{2T_s^2} \tag{3}$$

und $T_s \gg T$ erhält man für die Koeffizienten

$$b_1 = \frac{V_s T}{2T_s}, \qquad b_2 = \frac{V_s T}{2T_s}\left(1 - \frac{T}{T_s}\right) \approx \frac{V_s T}{2T_s}$$

und damit die bequemer handhabbare Regelstreckenbeschreibung

$$G_s(z^{-1}) = \frac{b(z^{-1} + z^{-2})}{2(1 - a z^{-1})} z^{-1} \tag{4}$$

mit $b = V_s T/T_s$; $a = \exp(-T/T_s)$.

Bild 3 zeigt den normierten Signalflußplan der digitalen Drehzahlregelung im z-Nereich, der den weiteren Ausführungen zugrunde liegt.

2. Regelalgorithmen zur Drehzahlregelung

Als Beispiele für einsetzbare digitale Drehzahlregler werden die Regler auf endliche Einstellzeit (EEZ-Regler) mit und ohne Stellgrößenvorgabe und ein betragsoptimal eingestellter Regler für die typische Drehzahlregelstrecke nach (4) bezüglich ihres Regelverhaltens miteinander verglichen.

EEZ-Regler lassen sich beispielsweise nach dem in [4] angegebenen Syntheseverfahren direkt anhand der z-Übertragungsfunktion der Regelstrecke entwerfen.

Für die Regelstrecke nach (4) erhält man folgende allgemeine Differenzengleichung für führungsoptimale EEZ-Regler und Stellgrößenvorgabe für $m - 1$ Abtastschritte nach dem Ansatz $y(0) = \dots = y(m-1)$:

$$y(n) = l_0[k_0(x_w(n) - k_m x_w(n - m)) + \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{m} l_j(y(n - d - j) + y(n - d - j - 1))] \tag{5}$$

mit

$d = T_t/T$ (T_t Summe der Totzeiten im Regelkreis),

$$k_0 = 1/b, \qquad k_m = a^m,$$

$$l_0 = \frac{1}{\sum_{i=0}^{m-1} a^i}, \qquad l_j = a^{j-1}.$$

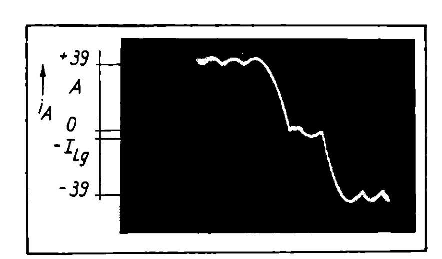


Bild 1. Stromrichtungsumkehr (Reversieren) $+0{,}8\,I_{AN} \to -0{,}8\,I_{AN}$; I_{Lg} Lückgrenzstrom. Deutlich sind die stromlose Pause und der anschließende Übergang über die Lückgrenze zu erkennen.

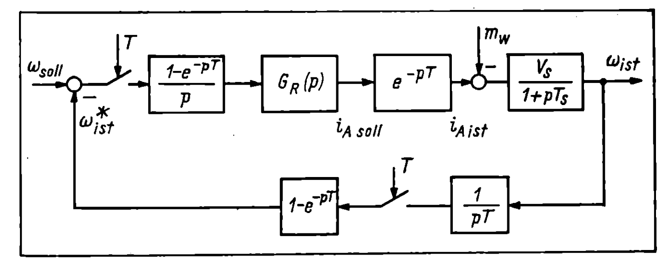


Bild 2. Signalflußplan im p-Bereich

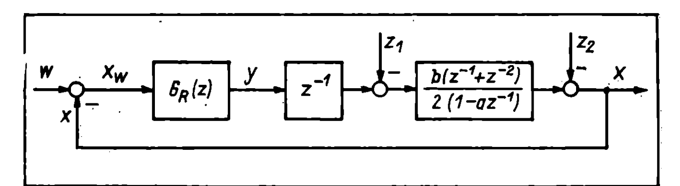


Bild 3. Signalflußplan im z-Bereich

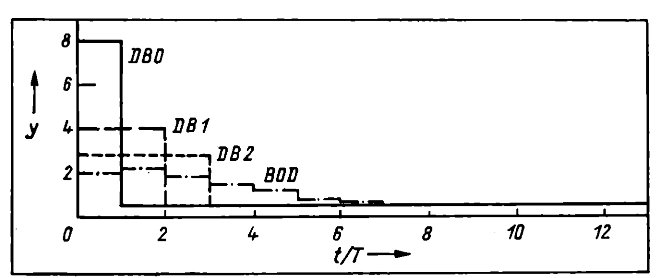


Bild 4. Stellgrößenverlauf
$b = 0{,}125$; $a = 0{,}95$

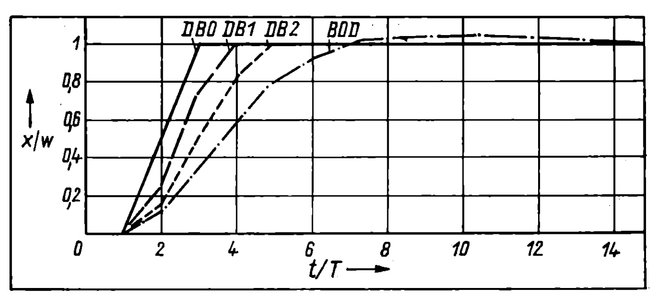


Bild 5. Regelgrößenverlauf

Für $T_s \gg T$ ist für die Koeffizienten l_j die Vereinfachung $l_0 = 1/m$, $l_j = 1$ zulässig. Für $m = 1$ ergibt sich der Regler mit minimaler endlicher Einstellzeit (DBO). Weiterhin wurden die Regler mit einem und zwei zusätzlichen Anregelschritten (DB1 bzw. DB2) in die experimentellen Untersuchungen einbezogen.

Eine allgemeine Optimierungsvorschrift zur Synthese digitaler Regler nach dem Betragsoptimum wird in [2] angegeben. Beim Ansatz wird davon ausgegangen, daß durch den Regler das Nennerpolynom ganz oder teilweise kompensiert wird und der digitale Regler einen I-Anteil hat. Somit erhält man für die Drehzahlregelstrecke nach (4) unter Vorgabe der Kompensation der Streckenzeitkonstante T_s die Reglerstruktur

$$G_R = \frac{V_R(1 - e^{-T/T_s} \cdot z^{-1})}{1 - z^{-1}}. \tag{6}$$

Das führt zu der Differenzengleichung des betragsoptimalen Reglers (BOD)

$$y(n) = k_0(x_w(n) - k_1 x_w(n - 1)) + y(n - 1) \tag{7}$$

mit den Reglerkonstanten nach den Optimierungsbedingungen des Betragsoptimums

$$k_0 = V_R = \frac{T_s}{4V_S T} = \frac{1}{4b} \text{ und } \quad k_1 = e^{-T/T_s} = a \,.$$

Die Bilder 4 und 5 zeigen die Verläufe von Regelgröße x und Stellgröße y nach einer sprungförmigen Führungsgrößenänderung für die vier betrachteten Reglertypen (die berechneten Regelgrößenverläufe zu den Abtastzeitpunkten wurden der Übersichtlichkeit halber durch kontinuierliche Kurvenzüge verbunden).

3. Zusammenwirken von Drehzahlregelung und unterlagerter Stromregelung

Der Reglerentwurf des vorangegangenen Abschnitts setzt lineare Verhältnisse in den Regelkreisen voraus. Tatsächlich tritt aber stets die Stellgrößenbegrenzung als Nichtlinearität auf, beim Reversieren ist der Zeitverlauf des Umsteuervorgangs arbeitspunktabhängig und die Stromumkehr erfolgt nicht kontinuierlich (s. Bild 1). Diese Gegebenheiten müssen im Drehzahlregelalgorithmus Beachtung finden.

Die Stellgröße des Drehzahlregelkreises wird durch den maximal zulässigen Ankerstrom begrenzt. Mit dem Mikrorechnerregler ist nach [1] eine exakte Berücksichtigung der Strombegrenzung möglich, indem er die Vergangenheitswerte des Regelalgorithmus entsprechend der tatsächlich realisierten Stellgröße modifiziert. Es wird eine fiktive Regelabweichung x_{wk} angenommen, die gerade so groß ist, daß die Stellgröße den linearen Arbeitsbereich voll ausschöpft. Beim Eintreten in die Stellgrößenbegrenzung werden

$$\left. \begin{aligned} y(n) &= y_{gr} \,, \\ x_w(n) &= x_{wk}(n) \end{aligned} \right\} \tag{8}$$

gesetzt. Die korrigierte Regelabweichung x_{wk}, die als Vergangenheitswert Berücksichtigung findet, berechnet sich dabei wie folgt:

$$k_0 x_{wk}(n) = k_0 x_w(n) + y_{gr} - y(n) \,. \tag{9}$$

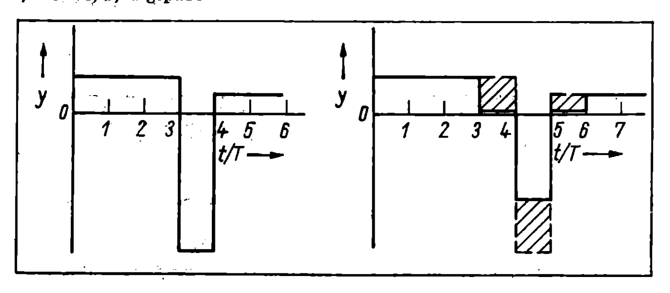
Durch die Begrenzungsverrechnung erreicht die Regelgröße nach Verlassen der Begrenzung in der gleichen Abtastperiodenzahl ihren Sollwert wie im Kleinsignalverhalten des linearen Regelkreises.

Voraussetzung für die Einzeloptimierung der einander überlagerten Regelkreise einer Kaskadenregelung ist ihre dynamische Entkopplung. Für die angestrebte hohe Dynamik der Drehzahlregelung ist diese Bedingung speziell bei der Stromrichtungsumkehr normalerweise nicht erfüllt. Bei den vorgegebenen Abtastzeiten von Strom und Drehzahl erhält der Stromregler jede zweite Stromabtastperiode einen neuen Stromsollwert. Die Stromregelung kann größeren Stromsollwertänderungen mit der Dynamik des Kleinsignalverhaltens nicht folgen, da die realisierbare Stromänderungsgeschwindigkeit und der zeitliche Ablauf der Stromumkehr von der Arbeitsweise des netzgelöschten Thyristorstromrichters abhängig sind.

Um ein „Zurückbleiben" der Stromregelung zu vermeiden, kann nicht jeder neue Stromsollwert berücksichtigt werden. Der Stellgrößenverlauf mit dem Regler DB0 im Bild 6a zeigt einen solchen Fall.

Die für die Dauer einer Abtastperiode am Stromregler anliegende negative Stellgröße kann dieser nicht realisieren, da dazu innerhalb zweier Abtastperioden der Drehzahlregelung zwei vollständige Reversiervorgänge notwendig wären. Geht man davon aus, daß der stationäre Arbeitspunkt der Stromregelung vor der Sollwertänderung weit im Gleichrichterbereich lag, so wird der Ankerstrom frühestens nach zwei Abtastperioden der Stromregelung zu Null, so daß die erste Brückenumschaltung erst dann beginnen kann, wenn der nächste Stromsollwert bereits anliegt. Eingriffe in die Dyamik der Drehzahlregelung nach Sollwertänderungen, die einen Wechsel des Vorzeichens der

Bild 6. Stellgrößenverläufe für die Drehzahlregelung mit dem Regler DB0
a) normal; b) angepaßt



Stellgröße zur Folge haben, sind also unumgänglich, um eine Anpassung des Stellgrößenverlaufs an die Arbeitsweise der Stromregelung vorzunehmen. Diese Stellgrößensteuerung hat folgenden Ablauf (Bild 6b):

- Vorzeichenwechsel des Stromsollwertes (1. Reversieren)
- Ausgabe $y = 0$ (1 Takt)
- Berechnung und Ausgabe negativer Stromsollwerte y
- Ausgabe $y = 0$ (1 Takt, 2. Reversieren)
- Ausgabe positiver Stellgrößen.

Wegen dieser Steuerung ist eine Manipulation der vom Regelalgorithmus berechneten Stellgrößen notwendig, um den gewünschten Regelgrößenverlauf beizubehalten. Grundlage dafür ist die bereits vorgestellte Begrenzungsverrechnung, wobei $y = 0$ als Begrenzung betrachtet wird. Diese Methode eignet sich allerdings nur für die Behandlung des ersten Reversiervorganges im Bild 6b. Hier kann die Korrektur „rückwirkend" erfolgen, da sich die Beeinflussung des Stellgrößenverlaufs verzögernd auf die beabsichtigte Drehzahländerung auswirkt und daher in einer der darauffolgenden Abtastperioden wieder ausgeglichen werden kann. Anders liegen die Verhältnisse beim zweiten Reversieren. Eine zeitliche Verschiebung der Stromrichtungsumkehr läßt die Drehzahl zu stark absinken, so daß sich ein Unterschwingen der Drehzahl einstellt, das sich nicht mehr nachträglich korrigieren läßt.

Aus diesem Grund ist eine „vorausschauende" Begrenzungsverrechnung notwendig, d. h. es wird in jeder Abtastperiode überprüft, ob sich die im nächsten Takt ergebende Stellgröße unbegrenzt ausbilden kann. Ist das nicht der Fall, muß eine Korrektur des aktuellen Stellgrößenwertes vorgenommen werden. Mit der allgemeinen Stellgrößenübertragungsfunktion für die im Abschn. 2. betrachteten Regler auf endliche Einstellzeit erhält man aus

$$y(n) = k_0(w(n) - k_m w(n-m)) \tag{10}$$

die Stellgrößenübertragungsgleichung

$$y(n+m) = k_0(w(n+m) - k_m w(n)) \tag{11}$$

und für $w(n+m) = w(n+m-1) = \dots = w(n)$:

$$y(n+m) = k_0(1-k_m)\, w(n) = y_{st1} \,. \tag{12}$$

Der Wert y_{st1} entspricht der neuen stationären Stellgröße im eingeschwungenen Zustand nach Beendigung des Übergangsvorganges. Es sei nun zum Zeitpunkt $n + m$ eine Stellgrößenbegrenzung y_{gr} wirksam, so daß $y(n+m)$ nicht unmittelbar realisierbar ist. Diese Begrenzung kann durch eine Korrektur von $w(n)$ in (11) kompensiert werden:

$$y_{gr} = k_0(w(n+m) - k_m w_k(n)) \,. \tag{13}$$

Die Subtraktion von (11) und (13) liefert

$$y(n+m) - y_{gr} = k_0 k_m (w_k(n) - w(n)) \,, \tag{14}$$

womit die Beziehung zur Ermittlung eines fiktiven korrigierten Sollwertes $w_k(n)$ gefunden ist. Zusammen mit (10) ergibt sich nun die Vorschrift für die Stellgrößenkorrektur im n-ten Schritt:

$$y(n) = k_0(w_k(n) - k_m w(n-m)) \,. \tag{15}$$

Nach Subtraktion von (15) und (10) wird daraus

$$y(n) - y_k(n) = k_0(w(n) - w_k(n)) \,. \tag{16}$$

Einsetzen von (14) in (16) zur Eliminierung von $w_k(n)$ führt schließlich zu

$$y_k(n) = y(n) + (y(n+m) - y_{gr})/k_m \,. \tag{17}$$

Der Wert $y(n+m)$ entspricht nach (12) der neuen stationären Stellgröße y_{st1}.

Für $k_m \approx 1$ und $y_{gr} = 0$ kann (17) vereinfacht werden zu

$$y_k(n) = y(n) + y_{st1} \,. \tag{18}$$

Die Korrektur nach (18) hilft aber nur, wenn $y_k(n)$ und $y(n)$ das gleiche Vorzeichen haben, d. h. y_k noch kein Reversieren erzwingt, andernfalls hätte die vorausschauende Korrektur bereits im Takt $(n-1)$ ausgeführt werden müssen. Eine Vorausberechnung der Stellgröße über mehrere Abtastperioden ist aber praktisch nur mit unvertretbar hohem Aufwand realisierbar. Es ist daher zweckmäßig, die Korrektur nach (17) bzw. (18) bereits an der Stellgröße $y(1)$, wenn der Sollwertsprung zum Zeitpunkt $n = 0$ erfolgte, vorzunehmen.

Als Beispiel soll der Regelkreis mit dem Regler DB0 betrachtet werden. Hier ist die Stellgrößenkorrektur beider Reversiervorgänge innerhalb einer Abtastperiode notwendig, da die Stellgröße im Kleinsignalverhalten nur einen Takt lang das Vorzeichen wechselt (s. Bild 6.). Aus der Reglergleichung (5) erhält man für $y(0)$ bei einer Führungsgrößenänderung im Takt $n = 0$

$$y'(0) = k_0 x_w(0) + y(-3) = k_0 x_w(0) + y_{st0}$$

mit $x_w < 0$.

Ausgegeben wird $y(0) = 0$, so daß eine Korrektur der Regelabweichung nach (9) notwendig ist

$$x_{wk} = \frac{y_{gr} - y'(0)}{k_0} + x_w(0)$$

und mit $y_{gr} = 0$

$$x_{wk}(0) = -\frac{y'(0)}{k_0} + x_w(0) .$$

Die Berechnung der Stellgröße der nächsten Abtastperiode bezieht neben der korrigierten Regelabweichung als Folge des ersten Reversierens auch die vorausschauende Begrenzungsverrechnung nach (17) ein

$$y(1) = k_0 x_w(1) + k_1 y'(0) - k_0 k_1 x_w(0) + y_{st0} + \frac{y_{st1}}{k_1} ,$$

woraus sich nach Umformungen schließlich:

$$y(1) = y'(0) + k_1 y_{st0} + \frac{y_{st1}}{k_1} \qquad (19)$$

mit $x_w(0) = x_w(1)$ ergibt.
(19) liefert gleichzeitig eine Bedingung für die Einleitung des Reversiervorganges: Wenn gilt

$$|y'(0)| < \left| k_1 y_{st0} + \frac{y_{st1}}{k_1} \right| , \qquad (20)$$

ist keine Stromrichtungsumkehr notwendig, da $y(1)$ im Vorzeichen mit y_{st0} und y_{st1} übereinstimmt. Die Stellgröße wird auf Null begrenzt und diese Begrenzung rückwirkend nach (9) berücksichtigt. Dadurch läßt sich bei Schwankungen des Widerstandsmoments um Null sowie kleinen stationären Stellgrößen die Anzahl der Reversiervorgänge u. U. wesentlich verringern, was sich günstig auf die Laufruhe des Antriebs auswirkt. Zur Senkung des Rechenaufwands wird wegen $k_1 \approx 1$ in der praktischen Realisierung die Ungleichung

$$|y'(0)| < |y_{st0} + y_{st1}| \qquad (21)$$

ausgewertet. Die Anregelzeit erhöht sich wegen der zwei Begrenzungsschritte um zwei Abtastperioden.
Für den Fall, daß in Gegenrichtung zusätzlich mehrere Abtastperioden lang die Stellgrößenbegrenzung y_{max} wirksam ist, führt die Korrektur nach (17) nicht mehr exakt zum gewünschten Regelgrößenverlauf. Als Korrekturvorschrift müßte

$$y_k = y(1) + \frac{1}{k_m a^q} (y_{st1} - y_{gr}) \qquad (22)$$

q Anzahl der Abtastperioden in Gegenrichtung mit $y(n) = y_{max}$

angewendet werden. Praktisch ist die Beziehung (22) allerdings nicht nutzbar, da dazu zum Zeitpunkt $n = 1$ bereits die Anzahl der Abtastperioden mit wirksamer Strombegrenzung bekannt sein müßte, so daß der bei Anwendung von (17) auftretende geringe Fehler in Kauf genommen werden muß.
Ähnliche Überlegungen lassen sich auch für die Regler DB1 und DB2 anstellen. Für den Regler BOD ist wegen der komplizierteren Stellgrößenübertragungsfunktion keine geschlossene Ableitung der vorausschauenden Begrenzungsverrechnung möglich. Der Einsatz des betragsoptimalen Reglers hat allerdings dynamisch auch wesentlich geringere Stellgrößenbewegungen zur Folge (s. Bild 4), so daß die vorausschauende Stellgrößenkorrektur entfallen kann.
Die Oszillogramme in den Bildern 7 und 8 stellen Übergangsvorgänge bei Anwendung des Reglers DB1 ohne bzw. mit vorausschauender Begrenzungsverrechnung gegenüber.

4. Stationärer Betrieb der Drehzahlregelung und Störverhalten

Praktische Untersuchungen zeigten, daß die Forderungen nach höchster Regeldynamik und guter Laufruhe des Antriebs nicht miteinander vereinbar sind. Das gilt in besonderem Maß für den Regler DB0. Experimente am Laborantrieb ergaben, daß ein mit einem DB0-Regler ausgerüsteter Drehzahlregelkreis bereits im stationären Zustand zu starken Schwingungen neigte, sobald die Reglerparameter, von einer wesentlich zu kleinen Reglerverstärkung ausgehend, schrittweise in Richtung der optimalen Werte verstellt wurden. Es treten Stellgrößenschwingungen auf, denen die Stromregelung nicht mehr folgen kann, und das mechanische System wird zu Schwingungen angeregt. Dieses Verhalten tritt auch bei den übrigen EEZ-Reglern mit fallender Tendenz auf. Das erklärt sich aus dem abnehmenden Wert der Reglerverstärkung k_0:

Typ	DB0	DB1	DB2	BOD
k_0	$1/b$	$1/2b$	$1/3b$	$1/4b$

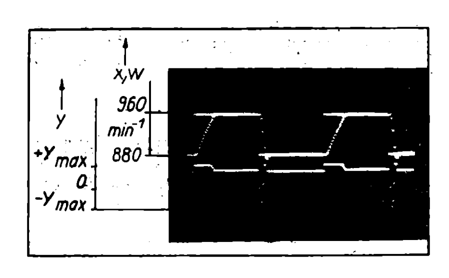


Bild 7. Reversieren ohne vorausschauende Begrenzungsverrechnung

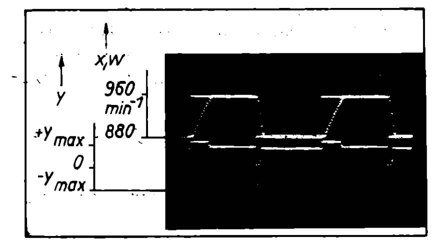


Bild 8. Reversieren mit vorausschauender Begrenzungsverrechnung

Eine befriedigende stationäre Laufruhe der Drehzahlregelung, vor allem im Bereich niedriger Drehzahlen, ließ sich nur mit dem BOD-Regler und unter Abstrichen mit dem Regler DB2 erreichen.
Soll nun ein gutes stationäres Verhalten mit einer hohen Regeldynamik zur Ausregelung von Sollwertänderungen und Störungen verbunden sein, so bietet sich die Reglerparameteranpassung in Abhängigkeit von der Regelabweichung an. Liegt die Regelgröße innerhalb eines vorzugebenden Toleranzbandes um die Führungsgröße, wird auf einen Reglerparametersatz mit einem kleinen Wert k_{0st}, der ein weitgehend gedämpftes Regelverhalten zur Folge hat, umgeschaltet.
Zur Reaktion auf Sollwertänderungen und größere Störungen, die die Regelabweichung aus dem Toleranzband heraustreten lassen, benutzt der Regler wieder die dynamisch optimalen Parameter. Damit der Übergang zu einer stark gedämpften Reglereinstellung nicht auf Kosten einer verringerten stationären Genauigkeit und folglich mit einer bleibenden Regelabweichung vor sich geht (Wegdriften der Drehzahl innerhalb des Toleranzbandes), ist auch der Reglerparameter k_m zu verstellen. Die Vorschrift dazu ergibt sich aus der allgemeinen Übertragungsfunktion der Regler aus Abschn. 2. Im stationären Zustand gilt:

$$y(n) = y(n-1) = y(n-2) = ...$$

$$x(n) = x(n-1) = x(n-2) = ...$$

und damit

$$y(n) = x_w(n)\,(k_0 - k_0 k_m) + y(n) \cdot \sum_{j=0}^{m} r_j . \qquad (23)$$

Wegen des I-Anteils der Regler ist

$$\sum_{j=0}^{m} r_j = 1$$

und somit vereinfacht sich (23) zu

$$0 = x_w(n)\,(k_0 - k_0 k_m) \qquad (24)$$

und man erhält die Bedingung für verschwindende Regelabweichungen. Da $k_m < 1$, kann nur $x_w = 0$ diese Gleichung erfüllen. Bei Ansatz eines I-Gliedes als Regelstreckenbeschreibung würde diese Bedingung wegen $k_m = 1$ auch für $x_w \neq 0$ erfüllt, so daß dadurch eine bleibende Regelabweichung auftreten kann.
Nun ist durch eine Überprüfung sicherzustellen, daß die o. g. Bedingung aufgrund der Amplitudenquantisierung und Rundungen der digitalen Verarbeitung nicht auch von $x_w = 1, 2, ...$ befriedigt wird. Die Zahlendarstellung im Mikrorechner erfolgt aus Zeitgründen im 16-bit-Festkommaformat (integer), so daß die Reglerkonstanten (k_0, k_m) mit einer bestimmten Kommastellenanzahl a vorgegeben werden. Der Produktbildung in (24) muß daher eine Division durch 2^a folgen, um mit konstanter Kommastellenanzahl weiterrechnen zu können. Für die Mikrorechneranwendung erhält (24) die Form

$$0 = x_w(n) \left(k_0 - \frac{k_0 k_m}{2^a} \right) . \qquad (25)$$

Die stationäre Genauigkeit ist nur dann gewährleistet, wenn eine Regelabweichung $x_w = 1$ mindestens auch eine Stellgrößen-

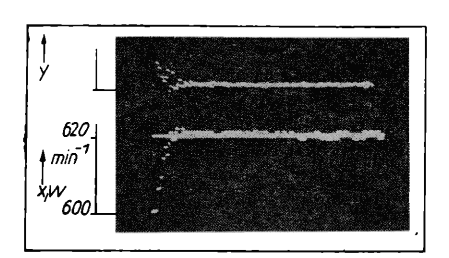


Bild 9. Regler DB1 mit Parameterumschaltung

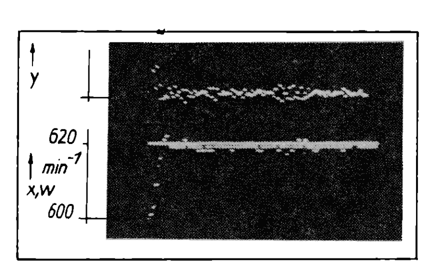


Bild 10. Regler DB1 ohne Parameterumschaltung

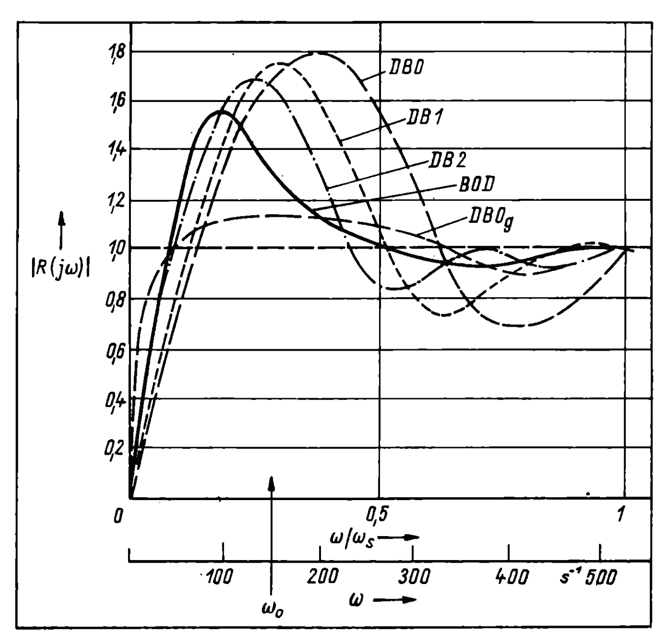


Bild 11. Verlauf von $|R(j\omega)|$ für die einzelnen Reglertypen

ω_0 Eigenfrequenz des Laborantriebs; DBO: Regler mit $k_0 = 1/b$; DBO_g: Regler nach Parameterumschaltung auf $k_{0st} = 1/4b$

änderung

$$\Delta y|_{x_w=1} = k_0 - \frac{k_0 k_m}{2^a} \overset{!}{\geqq} 1 \qquad (26)$$

bewirkt.
Aus dieser Ungleichung lassen sich zwei wichtige Bedingungen ableiten: Mit

$$2^a \geqq \frac{k_0 k_m}{k_0 - 1} \qquad (27)$$

erhält man eine Vorschrift zur Festlegung der Mindestkommastellenanzahl a bei gegebenen Werten k_0 und k_m, und

$$k_m \leqq \frac{2^a (k_{0st} - 1)}{k_{0st}} \qquad (28)$$

liefert die Beziehung zur Verstellung von k_m im stationären Betrieb. Aus (27) läßt sich die wichtige Schlußfolgerung ziehen, daß bei Abarbeitung der Reglergleichung im 16-bit-Festkommaformat trotz eines Integralanteils im Regleransatz bei ungünstiger Wahl der Kommastellen eine bleibende Regelabweichung auftreten kann. In Reglern mit kleinem k_0 (z. B. BOD-Regler) kann daher u. U. eine größere Kommastellenanzahl notwendig sein, als es für den DB0-Regler der Fall ist. Die Quantisierung macht sich erst bemerkbar, wenn die Regelabweichung in der Größenordnung der Quantisierungseinheit liegt. Die Bilder 9 und 10 zeigen Übergangsvorgänge bei Anwendung des DB1-Reglers mit und ohne Parameterumschaltung.
Eine sehr wirkungsvolle Aussage über das Verhalten des geschlossenen Regelkreises gegenüber Störungen verschiedener Frequenzen gestattet der dynamische Regelfaktor R, der wie folgt definiert ist [6]:

$$R(z) = \frac{1}{1 + G_R(z)\, G_S(z)} \,. \qquad (29)$$

Die Polstellen des dynamischen Regelfaktors stimmen mit denen des geschlossenen Regelkreises überein, so daß R über die Eigenbewegung und die Stabilität des Gesamtsystems Auskunft gibt. Nach Bild 3 gilt:

$$x(z) = -R(z)\, G_s(z)\, z_1 \qquad (30)$$

bzw.

$$x(z) = -R(z)\, z_2 \,. \qquad (31)$$

Mit $z = e^{j\omega T}$ läßt sich der Betrag von R über der Frequenz für die betrachteten Reglertypen im Frequenzbereich $0 \leqq \omega \leqq \omega_s$ mit $\omega_s = \pi/T$ (Shannonsche Kreisfrequenz) darstellen (Bild 11). Die Kurvenverläufe zeigen drei Zonen der Reglerwirksamkeit, die eine Abschätzung der Regelgüte für verschiedene Störsignalspektren zulassen. Im Bereich niedriger Frequenzen ist der Betrag $|R(j\omega)| < 1$, so daß hier die Störungen gedämpft werden und sich die Arbeitsweise des Regelkreises positiv bemerkbar macht. Daran schließt sich der Bereich mittlerer Frequenzen mit der reglertypischen Resonanzspitze an. Diese Zone ist der Bereich der Eigenbewegung des Systems und entscheidet über Stabilität und Dämpfung. Da hier $|R(j\omega)| > 1$, führt die Funktion des Reglers zu einer Verstärkung der Störung. Im Bereich hoher Frequenzen ist $|R(j\omega)| \approx 1$, so daß Störungen kaum noch beeinflußt werden, da sich bei diesen Frequenzen die Wirkung des Reglers praktisch nicht mehr äußert.
In der Praxis zeigt sich die Wirkung des Resonanzmaximums vor allem im unterschiedlichen Vermögen der eingesetzten Regler, durch Momentenstöße (Reversieren) hervorgerufene Drehzahlschwingungen des mechanischen Gesamtsystems auszugleichen. Das günstigste Verhalten weist hier wiederum der BOD-Regler auf, da seine Resonanzspitze am kleinsten ist. Der dynamische Regelfaktor gestattet auch Aussagen über den Einfluß von kleinen Änderungen der Regelstreckenparameter auf das Übertragungsverhalten des geschlossenen Regelkreises auf der Grundlage von Empfindlichkeitsmethoden [7]. Speziell für die Regelstreckenverstärkung b im Bild 3 stimmt die Empfindlichkeitsfunktion mit dem dynamischen Regelfaktor R überein. Auch hier verhält sich der BOD-Regler insgesamt gesehen am unempfindlichsten, da im Bereich $|R(j\omega)| < 1$ Parameterschwankungen durch den Regelkreis unterdrückt werden.

Zusammenfassung

Es läßt sich einschätzen, daß beim praktischen Einsatz digitaler Drehzahlregler vor allem ein Kompromiß zwischen Regeldynamik und stationärer Laufruhe bzw. dem Störverhalten zu finden ist. Der Vorteil der hohen Dynamik der EEZ-Regler wird durch andere Nachteile erkauft. Der Einsatz dieser Regler ist nur in Kombination mit einer Parameterumschaltung im stationären Betrieb zu empfehlen. Das günstigste Gesamtverhalten verspricht der betragsoptimale Regler.

Literatur

[1] *Schönfeld, R.* u. a.: Regelalgorithmen für digitale Regler von elektrischen Antrieben. msr, Berlin 28 (1985) 9, S. 390–394.
[2] *Krug, H.:* Das Betragsoptimum für digitale Regler von elektrischen Antrieben. msr, Berlin 28 (1985) 9, S. 394–399.
[3] *Geitner, G.-H.*, u. a.: Programmierung in Echtzeitanwendung. msr, Berlin 26 (1983) 2, S. 73–82.
[4] *Zimmermann, R.:* Dead-beat-Regelalgorithmen für Mikroprozessorregler. msr, Berlin 23 (1980) 2, S. 68–72.
[5] *Stoev, A.:* Durchgehend digitale Regelung von Gleichstromantrieben. Dissertation A, TU Dresden 1985.
[6] *Isermann, R.:* Digitale Regelsysteme. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1977.
[7] *Kuo, B. C.:* Automatische Steuerungs- und Regelungstechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1971.
msr 8541

G. Müller

Projektierung von Mikrorechner-Automatisierungsanlagen als Informationssystem

0. Einleitung

Die neue Generation mikroelektronischer Automatisierungssysteme (MR-AS) führt zu grundlegenden Veränderungen in der ingenieurtechnischen Vorbereitung (TEVO). Es verändern sich z. B. Projektierungsmethodik, Arbeitsmittel und Auftragsdurchlauf im Projektierungsbereich [1] bis [6]. Die Projektierung von Mikrorechner-Automatisierungsanlagen (MR-AA), die in [7] bis [10] als Dreiphasenprozeß charakterisiert wurde, wird unter dem informationellen Aspekt untersucht und als Informationssystem dargestellt. Die einzelnen Blöcke werden beschrieben. Der Informationsverarbeitungsblock, in dem die Projektierung in den Phasen Konzipierung, Entwurf und Ausführungsprojektierung erfolgt, wird hinsichtlich der Eingangs- und Ausgangsinformation zur Erfüllung von Automatisierungsfunktionen analysiert. Daraus werden relevante Merkmale der Projektierung abgeleitet.

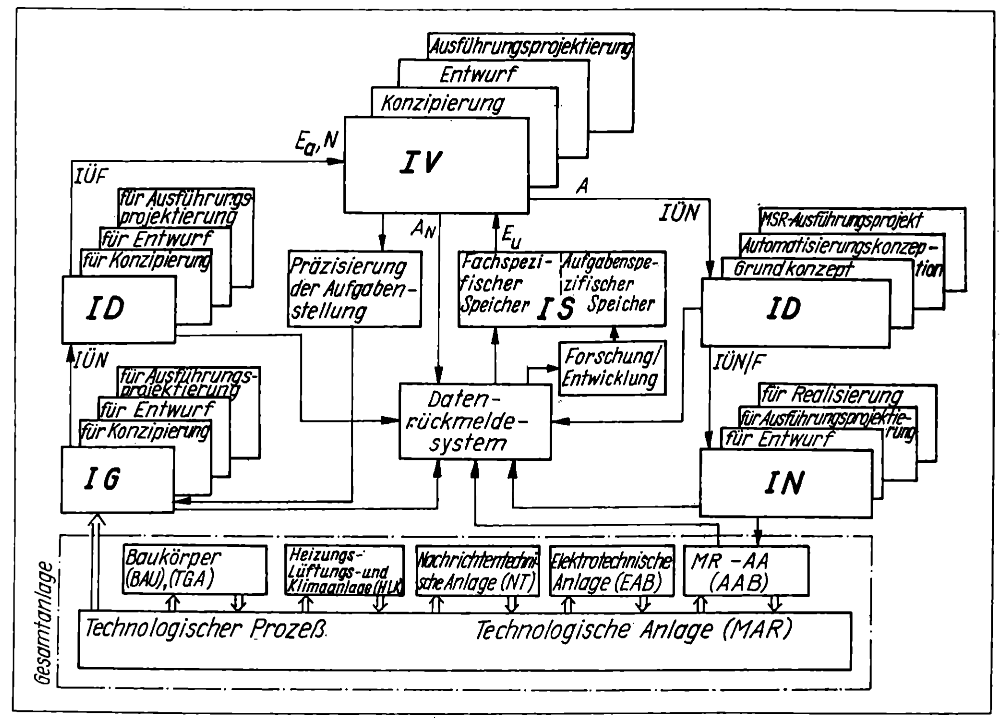


Bild 1. Projektierung von MR-AA als Informationssystem

AAB Automatisierungsanlagenbau; BAU Baugewerk (Tief-, Hoch-, Industriebau); EAB Elektroenergieanlagenbau; HLK Heizungs-, Lüftungs-, Klimatechnik; MAR Maschinen-, Apparate-, Rohrleitungstechnik; TGA Technische Gebäudeausrüstung; NT Nachrichtentechnik

1. Projektierung als Informationssystem

1.1. *Grundfunktionen im Projektierungsprozeß*

In Informationssystemen sind nachstehende Grundfunktionen typisch [11]:

- Informationsgewinnung (IG) am Objekt/Prozeß
- Informationsübertragung (IÜ) im Nahbereich (IÜN) und Fernbereich (IÜF)
- Informationsdarstellung (ID)
- Informationsverarbeitung (IV)
- Informationsnutzung (IN)
- Informationsspeicherung (IS).

Diese Grundfunktionen kommen in komplexen MR-AA vor. Die gleichen Funktionen sind auch für den dreiphasigen Projektierungsprozeß relevant. Allerdings ist bei allen Funktionen eine Reihe von Besonderheiten zu beachten.

1.2. *Informationssystem Projektierung*

1.2.1. Charakterisierung der Blöcke

Anhand von Bild 1 sollen die Blöcke des Informationssystems beschrieben werden. Das Objekt ist die technologische Anlage, in der ein Prozeß zur Energie- und/oder Stoffumwandlung abläuft. Entsprechend den drei Arten von Industrieanlageninvestitionen [12]

- Erneuerungsinvestition
- Erweiterungsinvestition
- Neubauinvestition

kann der technologische Prozeß bereits existieren oder er befindet sich, wie auch die MR-AA, im Stadium der Projektierung, woraus sich einige Schwierigkeiten ergeben.
Der wesentliche Inhalt der Blöcke ist am Beispiel der Erfüllung der Automatisierungsfunktionen in der Tafel angegeben.

1.2.1.1. Informationsgewinnung für IV

Die Ziele der IG und Art der Informationen in der Konzipierungs-, Entwurfs- und Ausführungsprojektierungsphase unterscheiden sich (s. Tafel). Bei Neubauinvestitionen ist die IG für die MSR-Projektierung besonders schwierig. Die gewonnenen Informationen sind durch einen hohen Grad der Unbestimmtheit und ein hohes Niveau der Dynamik/Änderbarkeit gekennzeichnet. Dadurch ist die Projektierung in den ersten beiden Phasen erschwert. Diese Situation zwingt zu intensiver Kooperation der an der Industrieanlageninvestition beteiligten Partner [6].
In der dritten Phase sind alle diejenigen Daten zu beschaffen, die für die Ausführungsprojektierung sämtlicher Hardware- und Softwarekomponenten erforderlich sind [8]. Besonders wichtig sind Angaben zu den zu messenden Prozeßgrößen, weil die Spezifizierung der Meßfühler, Anschlußstutzen, Absperrarmaturen, Wandler usw. vorzunehmen ist. Notwendig sind Angaben zu den zu verstellenden Stoffströmen und den Drücken und Druckabfällen in den Teilanlagen, Rohrleitungen usw., um auf dieser Basis die stellseitige Kopplung von AA und technologischer Anlage zu projektieren, d. h., es hat die Auswahl der Stellgliedarten, der Kennliniengrundform und die Spezifizierung der Stellantriebe und -glieder zu erfolgen.

1.2.1.2. Informationsdarstellung für IV

Die aus der Analyse des Prozesses und seiner Umwelt sowie den technisch-ökonomischen Forderungen gewonnenen Informationen sind in den Projektierungsphasen in geeigneter Weise zu dokumentieren [13]. Wichtige Aspekte der ID sind in der Tafel genannt. Es ist zu erkennen, daß in der Konzipierungsphase der qualitative Aspekt dominiert und in den folgenden Phasen der quantitative Gesichtspunkt immer stärker ausgeprägt wird. Die Formen der Dokumentationen sind auf die Projektierungsphasen abgestimmt. Für die Ausführungsprojektierung erfolgt die ID z. B. in den Arbeitsunterlagen.

Dr.-Ing. *Günter Müller* (41) studierte von 1964 bis 1969 Regelungstechnik an der TH „Otto von Guericke" Magdeburg (THM). 1969 bis 1972 planmäßige Aspirantur und Promotion am Moskauer Energetischen Institut, Fakultät für Automatisierungs- und Rechentechnik. 1972 bis 1980 wissenschaftlicher Assistent an der THM, Sektion Technische Kybernetik und Elektrotechnik, WB Regelungstechnik und Prozeßsteuerungen. 1980 bis 1983 Projektingenieur für Prozeßrechentechnik im VEB Geräte- und Regler-Werke „Wilhelm Pieck" Teltow. Seit 1984 wissenschaftlicher Oberassistent an der THM.

Tafel. Grundfunktionen in den Projektierungsphasen zur Erfüllung der Automatisierungsfunktionen

	Konzipierung	Entwurf	Ausführungsprojektierung
Informationsgewinnung	Durchführung einer Analyse des technologischen Prozesses zum Zwecke der Erarbeitung einer übersichtlichen Prozeßbeschreibung, ohne in die Details der physikalisch-chemischen Gesetzmäßigkeiten einzudringen	Fortsetzung der theoretischen und/oder experimentellen Prozeßanalyse mit dem Ziel der Erarbeitung mathematischer Beschreibungsmittel als Entwurfsgrundlage für Regelungs- und Binärsteuerungssysteme [25]	– Zusammenstellung der Prozeßgrößen und zustände und ihrer wichtigsten Werte – Güteforderungen an Messungen, Regelungen und Binärsteuerungen – Zuverlässigkeitsforderungen
Informationsdarstellung	– Verfahrensfließbilder mit den einzelnen Verfahrensstufen, Haupt- und Nebenprozessen u. ä. – Energie- und/oder Stoffflußschemata – Blockschaltbilder – Wirkschemata – verdichtete MSR-Stellenlisten – Modellansätze für dekomponierte Teilanlagen, Apparate usw.	– Angabe der Prozeßmodelle, der Parameter (soweit in dieser Phase möglich) (Differentialgleichungssystem, Übertragungsfunktionen, Zustandsraummodelle, Schaltfolgediagramme, Zustandsgraphen u. a.) – MSR-Stellenlisten (Grundliste)	– MSR-Stellenlisten – Übersichts-, Gruppendarstellungen – Anlagenbilder – Wörterbücher u. a. – Signalflußpläne – Regelalgorithmen – Programmablaufpläne – Logikpläne u. a.
Informationsverarbeitung	– Grobgliederung der MR-AA entsprechend den technologischen Komplexen – Festlegungen zu den Zentraleinrichtungen (Grobausrüstung, örtliche Anordnung) – Abschätzung der Ausrüstungen für den Grobkonfigurator der MR-AA (mit oder ohne Wartenrechner) – Festlegungen zu Funktionsblöcken (mehrere Funktionseinheiten)	– Synthese von Regelungs- und Binärsteuerungssystemen nach ingenieurmäßigen Methoden (Bode-Diagramm, P-N-Verteilung/Wurzelortskurve u. a.) oder mittels rechnergestützter Entwurfsmittel (CAD-Systeme) – Digitalrechnersimulation der entworfenen funktionellen Lösungen zur Überprüfung der Anforderungen (Echtzeit, Kanal- und Systemzuverlässigkeit, Regelgüte u. a.) – Festlegungen zu Funktionseinheiten	– Auswahl und Spezifizierung funktionsorientierter Module der Hardware- und Softwarekomponenten des MR-Automatisierungssystems und weiterer Bauteile – ggf. Projektierung spezieller Softwaremodule zur Funktionserfüllung – Digitalrechnersimulation (s. Entwurf)
Informationsdarstellung	– Warten-/Fahrstand-/Leitstandkonzept – Grobkonfigurator der MR-AA – Lageplan des Anlagenfeldes mit eingezeichneten Konzentrationspunkten dezentraler (DIVE) und zentraler Informationsverarbeitungseinrichtungen (ZIVE)	– Signalflußpläne der Regelungssysteme – Logikpläne der Binärsteuerungssysteme – Automatentabellen/-graphen – Funktionsschemata	– Ausrüstungslisten – Spezifikationsblätter (spezielle Module, Meßfühler, Stellglieder) – Liste der verwendeten Softwaremodule – Programmbeschreibung für spezielle Softwaremodule – Funktionsschaltpläne – Pläne zur Stromversorgung – Belegungspläne – Strukturpläne
Informationsnutzung	– erarbeitete Dokumentation ist Bestandteil des Grundkonzepts der MR-AA – Ergebnis fließt ein in die volkswirtschaftliche Aufgabenstellung für die weitere Vorbereitung der Industrieanlageninvestition – Nutzung in der Entwurfsphase Nutzung durch andere Gewerke (Bautechnik, Elektrotechnik, Nachrichtentechnik, Maschinen-/Apparate-/Rohrleitungstechnik)	– Dokumentation ist Bestandteil der Automatisierungskonzeption – Ergebnis fließt ein in das verbindliche Angebot mit Höchstpreisen – weitere Nutzung in Ausführungsprojektierung durch Auftragnehmer – Nutzung beim Auftraggeber und Betreiber zur Vorbereitung der Realisierung und des Dauerbetriebs	– Nutzung in der Materialwirtschaft, technologischen Fertigungsvorbereitung, stationären Fertigung, Anlagenmontage, Inbetriebsetzung, im Betrieb für Instandhaltung und Instandsetzung, bei der Vervollkommnung der MR-AA

1.2.1.3. Informationsverarbeitung

Die IV stellt den Kern der projektierenden Arbeitsweise dar. Während bei der Konzipierung der qualitative Aspekt überwiegt [14] und Grobfestlegungen durch den Projektanten erfolgen, besteht in der Entwurfsphase die Möglichkeit der quantitativen IV. Der Schwerpunkt liegt auf der Synthese funktionserfüllender Automatisierungssysteme [15] und [16] und Digitalrechnersimulation [17] als Dimensionierungshilfsmittel [18] und [19] für verschiedene Aspekte, z. B. Gestaltung des Bussystems [20], Hardware- und Softwaredimensionierung der Funktionseinheiten [21], Berechnung der Entwurfszuverlässigkeit für Informationskanäle, Teilsysteme und das Gesamtsystem [22]. Ein Schwerpunkt in der Ausführungsprojektierung besteht darin, entsprechend den notwendigen Automatisierungsfunktionen und -strukturen eine zielgerichtete Spezifizierung und Kombination von Hardware- und Softwarekomponenten im Rahmen der Konfigurierung und Strukturierung vorzunehmen.

1.2.1.4. Informationsdarstellung für IN

Die Darstellung der Informationen im Ergebnis der IV richtet sich hauptsächlich nach dem Nutzerbereich und ist spezifisch für die Projektierungsphasen. In der Tafel sind Beispiele angegeben, welche Dokumentationen im Grundkonzept, in der Automatisierungskonzeption und im MSR-Ausführungsprojekt im Ergebnis der Konzipierung, des Entwurfs und der Ausführungsprojektierung enthalten sind. Bei MR-AA besteht das Ausführungsprojekt aus der Konfigurierdokumentation (Hardwareprojekt – Projekt Teil I) und der Strukturierdokumentation (Softwareprojekt – Projekt Teil II).

1.2.1.5. Informationsnutzung

Die jeweils entstandene Dokumentation wird in der nächstfolgenden Phase genutzt. Das Grundkonzept der MR-AA wird Bestandteil der volkswirtschaftlichen Aufgabenstellung für die weitere Vorbereitung der Investition. Die Automatisierungskonzeption ist Grundlage für die Erarbeitung eines verbindlichen Angebots, das einen Teil der Dokumentation für die Grundsatzentscheidung darstellt. Das MSR-Ausführungsprojekt wird in den Realisierungsphasen stationäre Fertigung, Anlagenmontage, Inbetriebsetzung, für den Betrieb, die Vervollkommnung, Wartung und Reparatur aber auch für die Erarbeitung einer Ablösekonzeption zur teilweisen oder vollständigen Erneuerung der MR-AA genutzt. Es gibt folgende Nutzerbereiche: Auftraggeber, Auftragnehmer, zukünftiger Betreiber der Industrieanlage und verschiedene Fachbereiche, die an der Industrieanlageninvestition kooperativ mitwirken (s. Bild 1).

1.2.1.6. Informationsspeicherung

Eine zunehmende Bedeutung im dargestellten Informationssystem erlangt im Zeitalter der Informationstechnik die IS. Der Speicher wird von einem Datenrückmeldesystem beschrieben und aktualisiert. Der Begriff Speicher kann sehr weit gefaßt werden [23]:

– individuelles Gedächtnis des Projektingenieurs
– Erfahrungsschatz eines ganzen Kollektivs
– gedruckte Dokumentationen
– Speichermedien von Digitalrechnern (Halbleiterspeicher, Magnetbänder, Magnetbandkassetten, Magnetplatten, Magnetfolien).

Bei der IS kann es sich folglich um transiente oder permanente Speicher handeln. Für das betrachtete Informationssystem sind im Sinne einer in Zukunft sich immer mehr durchsetzenden rechnerunterstützten Projektierung die permanenten Speicher der Rechner von besonderem Interesse, da sie die Informationen ohne dauernde oder zeitweilige Energiezufuhr fehlerfrei speichern. Außerdem können in kürzester Zeit mit hoher Zuverläs-

sigkeit Informationen ausgegeben bzw. neue Informationen eingegeben werden. Die Flexibilität ist äußerst hoch.
Bei den Informationsspeichern können

- allgemeine (fachspezifische Speicher, Stammdatenspeicher)
- aufgabenspezifische (Ergebnisdatenspeicher)

Speicher unterschieden werden.
Zu den fachspezifischen Speichern gehören z. B.

- Kataloge für Hard- und Software, Vorschriften
- verbindliche Bestimmungen: Gesetzblätter, Standards, Verordnungen, Betriebsorganisationsanweisungen, Richtlinien
- Systembeschreibungen: MR-AS, Gerätesysteme der konventionellen und Mikrorechentechnik, Betriebssysteme, Hilfsmittel.

Aufgabenspezifische Speicher sind z. B.:

- funktionsorientierte wiederverwendbare Lösungen oder Teillösungen in den Projektierungsphasen
- Musterlösungen für Grundkonzepte, Automatisierungskonzeptionen, verbindliche Angebote, MSR-Ausführungsprojekte, Aufgabenstellungen für die Konzipierung, den Entwurf und die Ausführungsprojektierung, ggf. für bestimmte technologische Linien.

1.2.1.7. Datenrückmeldesystem

Auf das Datenrückmeldesystem gelangen Informationen, die bei den einzelnen Grundfunktionen im Sinne einer Effektivierung des Gesamtprozesses „Projektierung" entstehen. Im Datenrückmeldesystem werden die Informationen aufbereitet, verdichtet, bewertet und in den Speicher eines Rechners eingeschrieben. Der Speicher wird aktualisiert und mit effektiven und bewährten Lösungen gefüllt. Eine Möglichkeit besteht in der Durchführung der experimentellen Verhaltensanalyse von MR-AA, z. B. zur Überprüfung der Projektierungs- und Dimensionierungsergebnisse [24]. Mit dem Datenrückmeldesystem und dem Speicher entsteht ein lernendes System. Dieses Lernsystem rechnergestützt aufzubauen ist eine wichtige Aufgabe der nächsten Zeit, in der rechnergestützte Informationssysteme eine dominierende Rolle spielen werden. Mit der Durchsetzung des kybernetischen Prinzips der Rückkopplung in der Projektierung von MR-AA lassen sich große volkswirtschaftliche Effekte erzielen. Gegenwärtig wird die Datenrückmeldung nur sporadisch, wenn überhaupt, auf sehr wenigen Gebieten realisiert (z. B. Zuverlässigkeit).

1.2.2. Eingangsinformationen für die Informationsverarbeitung

1.2.2.1. Allgemeines

Gemäß Bild 1 gelangen auf den Block IV drei unterschiedliche Mengen von Informationen:

E_a Menge der objektabhängigen Eingangsinformationen;
E_u Menge der objektunabhängigen Eingangsinformationen;
N Menge der Nebenbedingungen.

Die Ausgangsinformationen sind:
A Menge der objektabhängigen Ausgangsinformationen; A_s Menge spezieller Ausgangsinformationen.

1.2.2.2. Objektabhängige Eingangsinformationen

Alle Beschreibungen, Dokumentationen, Automatisierungsfunktionen und Daten, die mit dem Automatisierungsobjekt im Zusammenhang stehen und sich i. allg. für die Konzipierung, den Entwurf und die Ausführungsprojektierung in den Informationen unterscheiden, stellen die objektabhängigen Eingangsinformationen E_a dar. Am Beispiel der Automatisierungsfunktionen, die getrennt für die einzelnen Prozeßgrößen dokumentiert sind, bedeutet das für die Konzipierung z. B. die verdichteten MSR-Stellenlisten für (s. Tafel):

- Messung/Informationsdarstellung (Informationssystem)
- Messung/Regelung/Informationsdarstellung (Regelungssystem)
- Messung/Binärsteuerung/Informationsdarstellung (Steuerungssystem)
- Messung/Sicherung/Informationsdarstellung (Sicherungssystem).

Für den Entwurf handelt es sich um die MSR-Stellenlisten in Form der Grundliste 1, d. h. um die Beschreibung der Automatisierungsfunktionen nach TGL 14091/01 und um die Beschreibung des Prozesses durch Modelle als Entwurfsgrundlage.
Bei der Ausführungsprojektierung werden bez. der Automatisierungsfunktionen z. B. Regelalgorithmen, Programmablaufpläne usw. benötigt.

1.2.2.3. Objektunabhängige Eingangsinformationen

Die objektunabhängigen Eingangsinformationen E_u werden aus dem Informationsspeicher abgerufen. Aus dem fachspezifischen Speicher werden z. B. Angaben zu den Hardware- und Softwarekomponenten, Anschluß- und Kombinationsbedingungen u. ä. für die IV benötigt. Der aufgabenspezifische Speicher liefert funktionsorientierte wiederverwendbare Lösungen unterschiedlichen Aggregationsgrades als Ergebnis der Projektierungsphasen.

1.2.2.4. Nebenbedingungen

Die Nebenbedingungen können sehr vielfältig sein und sich in den Projektierungsphasen unterscheiden. Auszugsweise seien Beispiele genannt [8]:

- technische Nebenbedingungen N_{tech}
  - einsetzbare Gerätesysteme, Einrichtungen, Module
  - Stand der Prozeßkenntnis (Modelle, Verriegelungsbedingungen)
  - Zuverlässigkeitsniveau bei der Funktionserfüllung
  - Mensch-Anlage-Kommunikation zur Funktionserfüllung unter allen Betriebsbedingungen
  - Umweltbedingungen, Platzangebot
- ökonomische Nebenbedingungen $N_{ök}$
  - Begrenzung der Investitions-, Bau-, Montage-, Betriebskosten, Importanteile, Stillstandszeiten, Rückflußdauer, des Wartungs- und Reparaturaufwandes, der notwendigen Arbeitskräfteanzahl für Bedienung
  - geplante Lebensdauer der MR-AA
  - Vorgabe einer Mindestlaufzeit zwischen zwei Reparaturstillständen
- organisatorische Nebenbedingungen N_{org}
  - Priorität des Investitionsvorhabens und des Projektierungsauftrages
  - verfügbare/aktivierbare Kapazitäten für Projektierung und Realisierung
  - Terminkette für Projektierungs- und Realisierungsphasen
  - Instandhaltungs- und Instandsetzungsstrategie für die MR-AA.

1.2.3. Ausgangsinformationen

1.2.3.1. Objektabhängige Ausgangsinformationen

In [7] wurden die Ausgangsdokumentationen der Projektierungsphasen charakterisiert. Am Beispiel der Automatisierungsfunktionen sollen für das Grundkonzept, die Automatisierungskonzeption und das MSR-Ausführungsprojekt (Konfigurier- und Strukturierdokumentationen) die entsprechenden Ausgangsinformationen genannt werden (s. Tafel):

- Mit der Auswahl des MR-AS und der Gerätesysteme ist in der Konzipierungsphase die prinzipielle Funktionserfüllung gegeben.
- In der Entwurfsphase werden die Binärsteuerungs- und Regelungssysteme z. B. als Signalflußplan und Logikplan synthetisiert und in Funktionsschemata dargestellt.
- Das Ergebnis der Ausführungsprojektierung sind Funktionspläne, Pläne zur Stromversorgung, Belegungspläne sowie Strukturpläne, in denen eine auf die Funktionserfüllung gerichtete Kombination spezifizierter Softwaremodule dokumentiert ist.

1.2.3.2. Spezielle Ausgangsinformationen

Zu ihnen gehören Projektierungserfahrungen sowie Vorschläge und Hinweise zur Verbesserung der Arbeitsmittel, der Projektierungstechnologie, der Dokumentation usw. Außerdem gehören dazu Forderungsprogramme an die Forschung und Entwicklung zur Vervollkommnung der Systemtechnik, Hardware und Software. Auch Forderungen zur Schaffung von Rationalisierungsmitteln für die Projektierung zählen dazu.

1.3. Neuer Begriffsinhalt der Projektierung

Der Block IV im Bild 1 stellt den Dreiphasenprozeß Projektierung dar. Aus informationeller Sicht kann ein neuer Begriffsinhalt der Projektierung formuliert werden.
Die *Projektierung* ist die optimale Verarbeitung der objektabhängigen Eingangsinformationen E_a unter Benutzung der objektunabhängigen Eingangsinformationen E_u und bei Beachtung der Nebenbedingungen N in der Art, daß die objektabhängigen Ausgangsinformationen A qualitativ und quantitativ den Anforderungen des jeweiligen Nutzerbereiches in den Phasen Konzipierung, Entwurf, Ausführungsprojektierung und den drei Realisierungsphasen sowie der Vervollkommnung und Ablösung bei allen Partnern des Investitionsprozesses (Auftraggeber, Auftragnehmer, Betreiber, verschiedene Fachbereiche) entsprechen.
In Anlehnung an diese Definition werden entsprechende Begriffserklärungen für die Konzipierung, den Entwurf und die Ausführungsprojektierung gegeben.

Die *Konzipierung* ist der Teil der Projektierung, der nach Ableitung der Automatisierungsfunktionen aus dem technologischen Prozeß und technisch-ökonomischer Anforderungen auf mindestens eine Prinziplösung der Automatisierungsanlage führt. Das Ergebnis der Konzipierung ist das Grundkonzept der Automatisierungsanlage. Die Konzipierung ist in erster Linie ein Problemlösungsprozeß in der Phase der Erarbeitung der volkswirtschaftlichen Aufgabenstellung für die weitere Vorbereitung der Investition.

Der *Entwurf* ist der Teil der Projektierung, der auf der Basis des Grundkonzepts der Automatisierungsanlage und weiterer objektabhängiger Unterlagen mindestens eine funktionelle, technische und ökonomische Automatisierungslösung soweit festlegt, daß die nachfolgende Ausführungsprojektierung eindeutig möglich ist. Das Ergebnis des Entwurfs ist die Automatisierungskonzeption. Der Entwurf ist eine Kombination von Problem- und Aufgabenlösungsprozeß in der Phase der Vorbereitung der Grundsatzentscheidung.

Die *Ausführungsprojektierung* ist der Teil der Projektierung, der auf der Basis der Automatisierungskonzeption und weiterer objektabhängiger Arbeitsunterlagen unter Nutzung einheitlicher Arbeitsmittel eine vollständige funktionelle, technische und ökonomische Automatisierungslösung einschließlich ihrer Herstellungs-, Prüf-, Montage-, Inbetriebsetzungs-, Bedien-, Betriebs-, Instandhaltungs- und Instandsetzungsvorschriften erarbeitet. Das Ergebnis der Ausführungsprojektierung ist das MSR-Ausführungsprojekt. Die Ausführungsprojektierung ist in erster Linie ein Aufgabenlösungsprozeß in der ersten Phase der Durchführung der Investition.

2. Projektierungsphasen und ihre Merkmale

2.1. *Eigenschaften der Informationen*

Die Anzahl der Informationen I nimmt in den Phasen Konzipierung (K), Entwurf (E) und Ausführungsprojektierung (A) zu [8]. Es gilt folgende Relation:

$$I_K < I_E < I_A .$$

Die Menge der Eingangsinformationen $\boldsymbol{E}$ am Beginn jeder Phase ergibt sich aus den drei Eingangsinformationsmengen:

$$\boldsymbol{E} = \{\boldsymbol{E}_a, \boldsymbol{E}_u, \boldsymbol{N}\}$$

Dabei ist zu beachten, daß die Anzahl der Informationen innerhalb der Projektierungsphasen mit fortschreitender Zeit zunimmt, bis sie schließlich in der jeweiligen Ergebnisdokumentation am größten ist. In dem Maße, wie die Anzahl der Informationen steigt, wachsen auch der Konkretheits-/Detaillierungsgrad und das Niveau der Determiniertheit der Informationen (Bild 2). Während z. B. in der Konzipierungsphase eine MSR-Stellenübersicht die Basis für die Grobauslegung der MR-AA ist, werden in der Ausführungsprojektierung vollständig ausgefüllte MSR-Stellenlisten benötigt. Der Grad der Unbestimmtheit und das Niveau der Dynamik der Informationen sowie der Abstraktionsgrad nehmen im Projektierungsprozeß ab.

2.2. *Merkmale der Projektierung*

Aus den Eigenschaften der Informationen, der Abnahme des Freiheitsgrades und der Verringerung der Wahrscheinlichkeit von Rückführungen in den Projektierungsphasen lassen sich drei relevante Merkmale der Projektierung ableiten (Bild 3) [8].

1. Die Zunahme der Anzahl der Informationen, die bei MR-AA die Hard- und Software sowie ihre Schnittstellen betrifft, und die Zunahme des Konkretheits-/Detaillierungsgrades sind in erster Linie verantwortlich für die *Erhöhung des Projektierungsaufwandes* mit zunehmender Phase. Hier bietet sich der Einsatz rechnerunterstützter bzw. rechnergestützter TEVO-Arbeitsplätze an [26] bis [32]. Sie gestatten die effektive Bewältigung der Informationsverarbeitung und geben der Projektierung ein neues Gepräge. Die Projektierungstätigkeit erhält in wesentlichen Aspekten einen neuen Inhalt, der im Umgang mit CAD/CAM-Systemen besteht.
2. Eine wichtige Aufgabe in der TEVO besteht darin, möglichst viele Problemlösungs- und vor allem Aufgabenlösungsprozesse zu algorithmisieren, um sie CAD/CAM-Systemen zugänglich zu machen. Die bedeutende *Vergrößerung des Anteils*

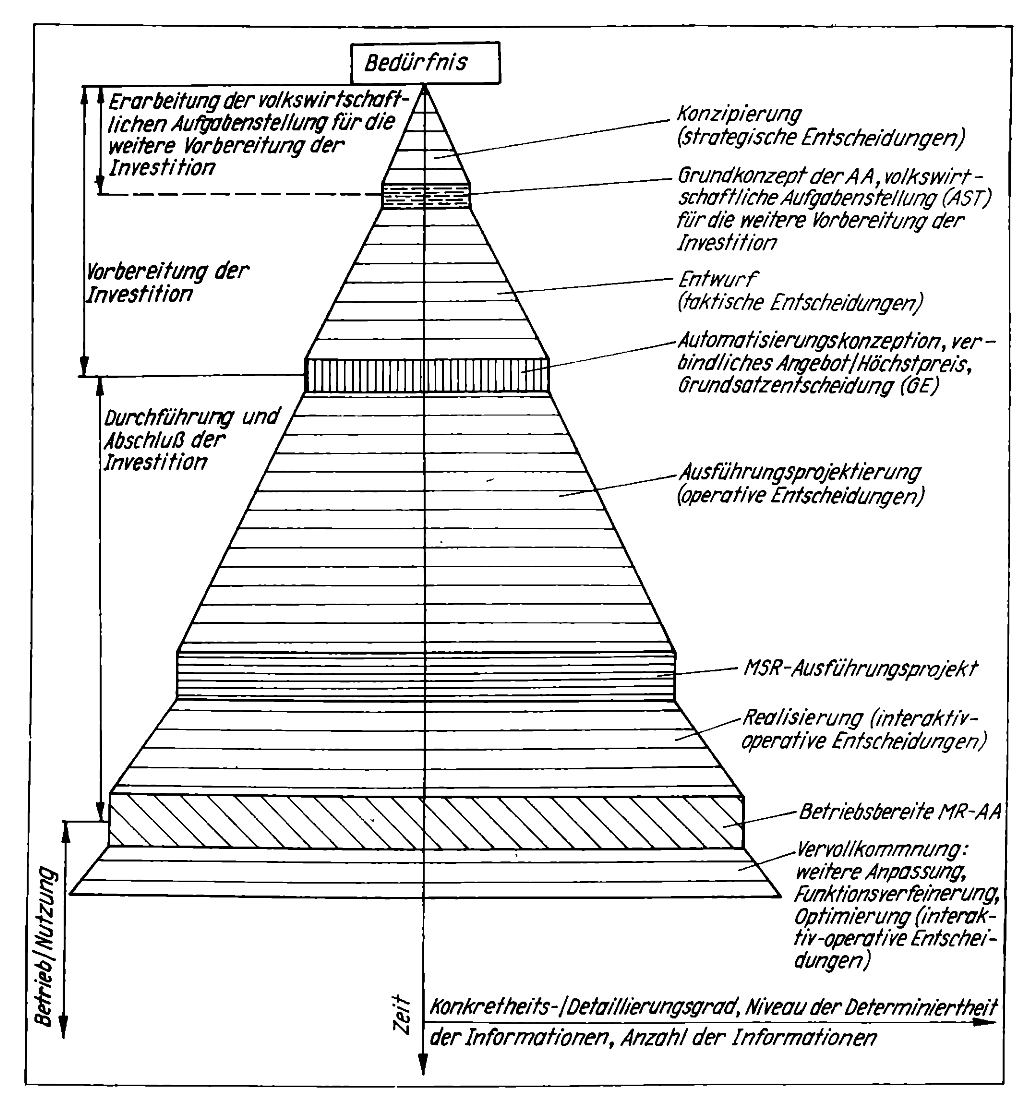


Bild 2. Eigenschaften der Informationen in der Projektierung von MR-AA

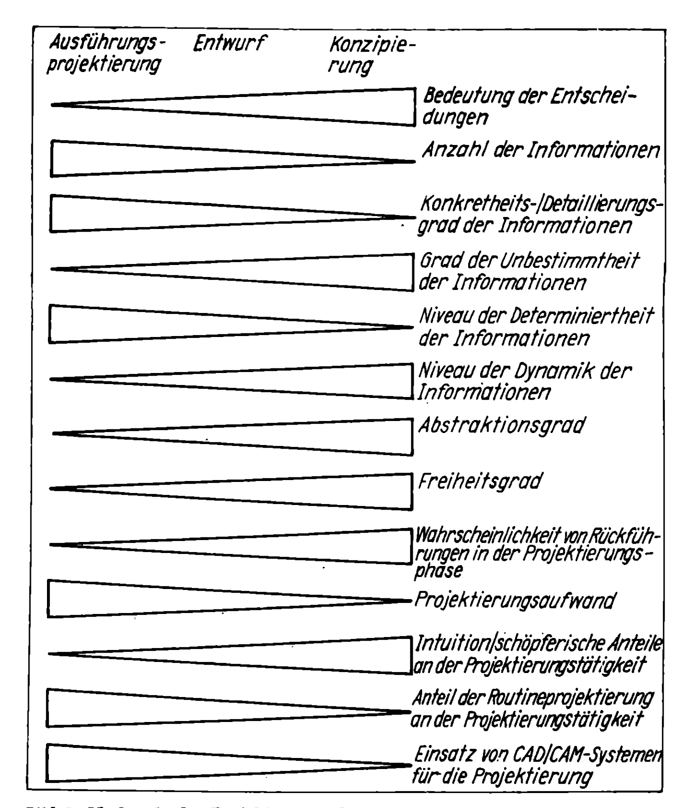


Bild 3. Merkmale der Projektierungsphasen

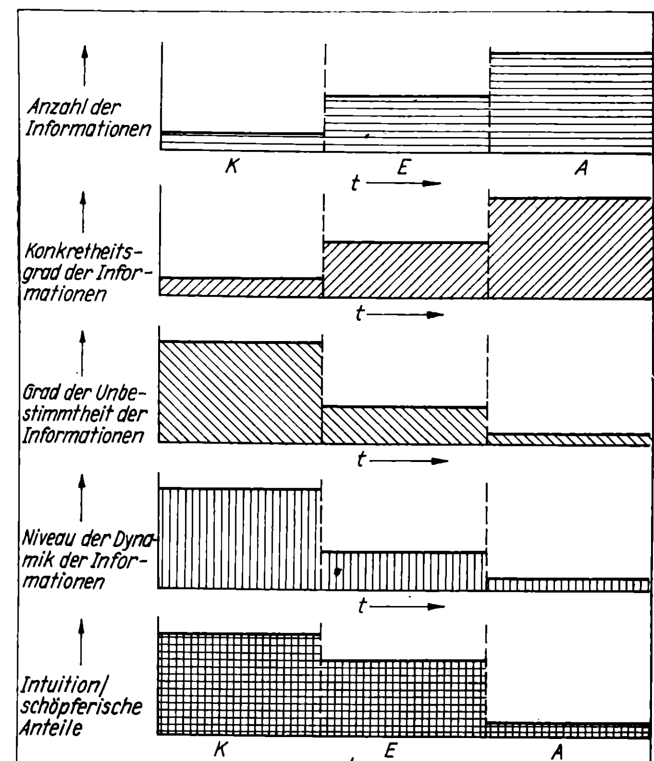


Bild 4. Einflußgrößen auf die Intuition in der Projektierung von MR-AA

der Routinetätigkeiten an den gesamten Projektierungsleistungen kommt der o. g. Aufgabe entgegen. Sie ergibt sich hauptsächlich aus der Zunahme der Anzahl der Informationen, des Detaillierungsgrades, des Niveaus der Determiniertheit, der Verringerung des Grades der Unbestimmtheit der Informationen und der Verringerung des Freiheitsgrades bei den zu fällenden Entscheidungen [9]. Die Routinetätigkeiten wirken begünstigend für den Einsatz von CAD/CAM-Systemen, d. h. die rechnergestützten TEVO-Arbeitsplätze ermöglichen die Beherrschung der Routinearbeit. Dadurch wird es möglich, daß sich der Projektingenieur verstärkt den Problemlösungsprozessen, d. h. den schöpferischen Arbeiten in der Konzipierungs- und Entwurfsphase zuwenden kann. Als Beispiele seien die Festlegung der Automatisierungsstruktur, der Entwurf von Binärsteuerungs- und Regelungssystemen in einer MR-AA oder der Entwurf von Automatisierungslösungen mit bestimmtem Zuverlässigkeitsniveau genannt. Das alles trägt dazu bei, das Projektieren interessanter zu gestalten und ein breites Schöpfertum der Projektingenieure zu entfalten.

3. Abschließend werden die informationellen Einflußgrößen und ihre Veränderung auf die Intuition im Projektierungsprozeß betrachtet (Bild 4). Zugrunde gelegt sind die Verhältnisse am Beginn einer jeden Phase. Die Veränderungen innerhalb der Phasen sind nicht ausgewiesen, zumal der Verlauf von vielen Einflußgrößen abhängt.

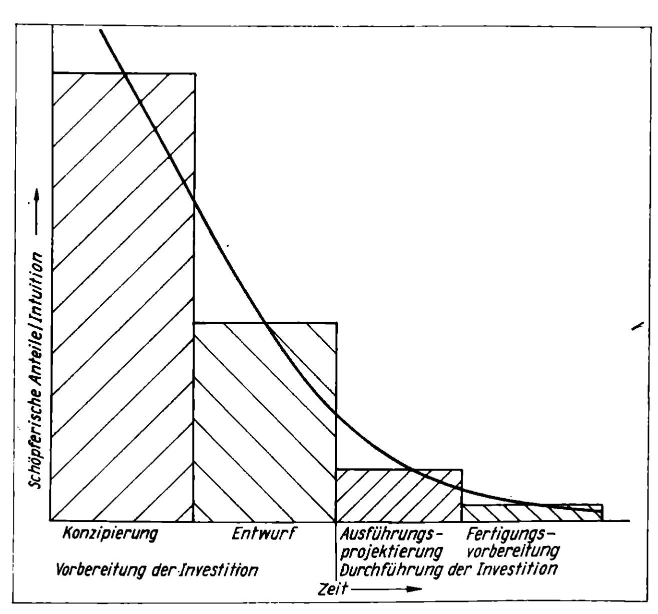
Die *Abnahme der Intuition* resultiert vor allem aus der Verringerung des Grades der Unbestimmtheit und des Niveaus der Dynamik der Informationen sowie aus der Zunahme der Anzahl der Informationen und ihres Konkretheitsgrades (Bild 5). Dieses Merkmal der Projektierung steht in Wechselwirkung mit Punkt 2. Während die CAD/CAM-Systeme für die Ausführungsprojektierung geradezu prädestiniert sind, finden sie auch in den vorgelagerten Phasen ein breites Anwendungsfeld, z. B. für die Strukturfindung einer MR-AA oder für die rechnergestützte Erarbeitung von Angeboten. Die Hauptproduktivkraft in der Projektierung ist und bleibt der Mensch mit seiner Arbeit und seinen schöpferischen Fähigkeiten.

Die Betrachtung der schöpferischen Tätigkeit wäre unvollständig ohne den Hinweis, daß das Schöpfertum des Projektingenieurs in den Realisierungsphasen sehr gefragt ist. Das trifft insbesondere für die Inbetriebsetzung zu, bei der die aktive Mitwirkung des Projektingenieurs von großer Bedeutung ist.

Zusammenfassung

Die Projektierung von MR-AA kann als Informationssystem dargestellt werden. Die Blöcke für die Gewinnung, Darstellung, Verarbeitung, Nutzung und Speicherung der Informationen sowie das Datenrückmeldesystem werden beschrieben. Die objektabhängigen und objektunabhängigen Eingangsinformationen sowie die Nebenbedingungen und objektabhängigen Ausgangsinformationen des Verarbeitungsblockes sind charakterisiert. Eine Begriffsdefinition der Projektierung und ihrer Phasen Konzipierung, Entwurf und Ausführungsprojektierung wird unter dem informationellen Aspekt gegeben. Ausgehend von den Eigenschaften der Informationen werden relevante Merkmale der Projektierung abgeleitet. Die Untersuchungen münden in der Feststellung, daß die schöpferischen Anteile im Projektierungsprozeß abnehmen und in gleichem Maße die Routinetätigkeiten zunehmen, wodurch der effektivere Einsatz von CAD/CAM-Systemen in den späteren Phasen des Projektierungsprozesses liegt. Die Entfaltung des Schöpfertums der Projektingenieure in den früheren Projektierungsphasen, in denen Entscheidungen großer Tragweite und Bedeutung zu fällen sind [12], führt zu großem volkswirtschaftlichen Nutzen.

Bild 5. Veränderung der schöpferischen Anteile/Intuition der TEVO von MR-AA



Literatur

[1] *Töpfer, H.; Kriesel, W.:* Automatisierungssysteme mit Mikroprozeßrechnern — Konsequenzen für die Projektierung. msr, Berlin 21 (1978) 8, S. 427–432.

[2] *Neumann, P.; Lemke, G.:* Auswirkungen des Mikrorechnereinsatzes in Automatisierungsanlagen auf die Projektierung, Fertigung, Prüfung und Inbetriebsetzung. Eine Einführung. Teltow: VEB Geräte- und Regler-Werke 1980, KDT-Reihe Automatisierungstechnik, Heft 3.

[3] *Franke, H.; Starke, L.:* Projektierung von Automatisierungssystemen auf Mikrorechnerbasis. Wiss.-techn. Informationen des VEB Kombinat Automatisierungsanlagenbau, Berlin 18 (1982) 1, S. 2–5.

[4] *Töpfer, H.; Kriesel, W.:* Automatisierungstechnik. Gegenwart und Zukunft. Band 200 der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK. Berlin: VEB Verlag Technik 1982.

[5] *Müller, R.:* Projektierung von Automatisierungsanlagen. Berlin: VEB Verlag Technik 1982.

[6] *Müller, R.; Starke, L.; Töpfer, H.:* Projektierung und Kooperation. msr, Berlin 27 (1984) 11, S. 482–487.

[7] *Müller, G.:* Phasen der Vorbereitung und Durchführung von Investitionen bei Mikrorechner-Automatisierungsanlagen. Tagungsmaterial zu den 15. Herbstkursen Technische Kybernetik. Magdeburg 22. bis 26. Oktober 1984, Sektion 4, S. 1–13.

[8] *Müller, G.:* Phasenmodell für die Projektierung und Realisierung von Mikrorechner-Automatisierungsanlagen. Forschungsbericht TH „Otto von Guericke" Magdeburg, Sektion Technische Kybernetik und Elektrotechnik, 1985 (interner Bericht).

[9] *Müller, G.:* Phasenmodell der Projektierung und Realisierung von Mikrorechner-Automatisierungsanlagen. msr, Berlin 29 (1986) 10, S. 438–442.

[10] *Kloust, H.:* Abstimmung neuer Vorschriften zu automatisierten Systemen zur Steuerung technologischer Prozesse (ASU TP) mit der UdSSR. msr, Berlin 28 (1985) 5, S. 217–219.

[11] *Jänicke, J.:* Systemregelung in der Investitionsvorbereitung. Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1972.

[12] Autorenkollektiv: Anlageninvestitionen. Leitung, Planung, Organisation. Berlin: Verlag Die Wirtschaft 1984.

[13] *Kloust, H.:* Schaltpläne für die Automatisierungstechnik. msr, Berlin 23 (1980) 10, S. 550–555.

[14] *Woschni, E.-G.:* Abschätzverfahren in der Automatisierungstechnik. Band 198 der REIHE AUTOMATISIERUNGSTECHNIK. Berlin: VEB Verlag Technik 1981.

[15] *Korn, U.; Wilfert, H.-H.:* Mehrgrößenregelungen, Moderne Entwurfsprinzipien im Zeit- und Frequenzbereich. Berlin: VEB Verlag Technik 1982.

[16] *Müller, G.:* Entwurf und Projektierung von audatec-Regelsystemen. Wiss.-techn. Informationen des VEB Kombinat Automatisierungsanlagenbau, Berlin 19 (1983) 1, S. 2–7.

[17] *Herpel, H.; Moltmann, B.; Müller, G.; Stern, U.:* Regelungstechnische Untersuchungen zum optimalen Strukturentwurf der Hauptregelkreise im Heizkraftwerk Karl-Marx-Stadt. 11. Jahrestagung „Grundlagen der Modellierung und Simulationstechnik". 14. bis 16. Dezember 1982, Rostock, S. 100–104.

[18] *Neumann, P.:* Zur Auslegungsberechnung bei verteilten Automatisierungsanlagen. msr, Berlin 24 (1981) 5, S. 279–283.

[19] *Neumann, P.:* Dimensionierung von Mikrorechner-Automatisierungsanlagen. Wiss. Zeitschrift der TH „Otto von Guericke" Magdeburg 27 (1983) 1/2, S. 43–48.

[20] *Sawatzky, J.:* Verhaltensanalyse von busgebundenen Kommunikationssystemen in Mikrorechner-Automatisierungsanlagen. Wiss. Zeitschrift der TH „Otto von Guericke" Magdeburg 28 (1984) 2, S. 96–103.

[21] *Sawatzky, J.:* Modellierung des internen Zeitverhaltens der Verarbeitungseinheit einer Mikrorechner-Automatisierungsanlage. Wiss. Zeitschrift der TH „Otto von Guericke" Magdeburg 27 (1983) 1/2, S. 55–59.

[22] *Häßner, H.:* Simulative Ermittlung der Zuverlässigkeitswerte von Mikrorechner-Automatisierungsanlagen. Tagungsmaterial IV. Symposium „Zuverlässigkeit", Magdeburg, 4. und 5. September 1984, S. 139–141.

[23] *Müller, G.:* Entwicklung der technischen Vorbereitung von Automatisierungsanlagen — eine historische Übersicht. msr, Berlin 27 (1984) 6, S. 257–262.

[24] *Neumann, P.; Ittner, W.:* Experimentelle Verhaltensanalyse in Mikrorechner-Automatisierungsanlagen. msr, Berlin 27 (1984) 3, S. 105–107.

[25] *Wernstedt, J.:* Methoden und Erfahrungen zur Prozeßsteuerung und Entscheidungsfindung durch den Menschen auf der Grundlage von Beratungs-/Expertensystemen. msr, Berlin 28 (1985) 7, S. 295–298.

[26] *Bennewitz, W.; Schmiele, J.:* Einige Gedanken zur Einführung von CAE-Arbeitsplätzen in der Anlagenautomatisierung. msr, Berlin 26 (1983) 12, S. 690–693.

[27] *Müller, K.-D.:* Komplexes Programm zur Entfaltung von KDT-Initiativen für die Durchsetzung der rechnergestützten Arbeit. msr, Berlin 27 (1984) 11, S. 508 und 524.

[28] *Urban, B.:* Quasigrafischer Projektierungsarbeitsplatz auf Basis Bürocomputer robotron A 5120/A 5130. Neue Technik im Büro, Berlin 28 (1984) 6, S. 174–177.

[29] *Willem, H.; Kuntsche, P.:* CAD/CAM-Arbeitsplätze des VEB Kombinat Robotron. msr, Berlin 27 (1984) 10, S. 446–449 und 457.

[30] *Fuchs, H.; Rudolph, H.:* Rechnergestützter Entwurf von Regelungssystemen. msr, Berlin 27 (1984) 11, S. 487–492.

[31] *Hanke, D.; Sadowski, H.:* Strukturierung der programmtechnischen Funktionen von audatec-Einrichtungen mit einem Dialog-Arbeitsplatz. msr, Berlin 28 (1985) 7, S. 306–309.

[32] *Ehlert, H.-H.; Schmiele, J.:* Anwendungsbeispiel für CAE-Arbeitsplätze in der Anlagenautomatisierung. msr, Berlin 28 (1985) 8, S. 375–377.

msr 8407

ISSN 0026-0347, mess., steuern, regeln
Berlin 29 (1986), S. 1—576

messen · steuern · regeln (msr)

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift
für die Automatisierungstechnik
Herausgeber: Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft
für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA) in der KDT
Verlag: VEB Verlag Technik
DDR-1020 Berlin, Oranienburger Str. 13/14

Jahresinhaltsverzeichnis 29 (1986)

Nach Fachgebieten geordnet —
Heft 1 bis 12, Seite 1 bis Seite 576

Sachwortverzeichnis

1. Allgemeine und mathematische Theorie der Regelung und Steuerung

2. Theoretische und experimentelle Untersuchung technischer Regelungssysteme und ihrer Bauglieder

3. Physikalische Anwendungsbereiche der Regelungs- und Steuerungstechnik

4. Regelungs- und Steuerungseinrichtungen und ihre Bauglieder

5. Anwendungen der Regelungs- und Steuerungstechnik

6. Sonstige Informationen über Regelungs- und Steuerungstechnik

7. Buchbesprechungen

8. DDR-Veranstaltungen

9. **Internationale Veranstaltungen**

10. **Dissertationen**

11. **Persönliches**

12. **Literatur**

13. **Aus der Arbeit der WGMA**

14. **Technische Informationen**

15. **Verschiedenes**

Autorenverzeichnis 29 (1986)

Nach Erstautoren geordnet; es sind nur Verfasser von Aufsätzen berücksichtigt

Jeder Autor ist daran interessiert, daß seine Veröffentlichung möglichst fehlerfrei und ohne Verzögerung in sauberer Darstellung erfolgt. Daher ist es außerordentlich wichtig, die folgenden Manuskripthinweise sorgfältig einzuhalten.

- Der Autor erklärt sich mit den Abnahmebedingungen (siehe Impressum jedes Heftes) einverstanden.

- Der Autor übernimmt die Verantwortung dafür, daß die im Manuskript dargelegten Aussagen zur Veröffentlichung freigegeben sind. Eine Veröffentlichungsfreigabeerklärung (bzw. eine Kopie davon) durch den Betrieb oder die Institution ist der Redaktion als Anlage zum Manuskript zu übergeben.

- Das Manuskript ist der Redaktion einschließlich aller Bild- und Tafelvorlagen in doppelter Ausfertigung zu übergeben.

- Das Manuskript ist unpersönlich abzufassen, d. h., Sätze mit „wir", „ich" und abgeleiteten Formen sind zu vermeiden. Abkürzungen, die nicht im Duden erfaßt sind, sind ebenfalls zu vermeiden oder bei ihrem ersten Auftreten zu erklären.

- Die Zeitschrift msr gliedert sich in einen Aufsatz- und in einen Rubrikenteil. Der Aufsatzteil erscheint im Zweispaltensatz, der Rubrikenteil, der u. a. Messe- und Tagungsberichte, Technische Informationen, Kurzinformationen, Buchbesprechungen und ähnliches enthält, erscheint im Dreispaltensatz. Beiträge für den Aufsatzteil sollen möglichst nicht mehr als 12 Schreibmaschinenseiten (zweizeilig, 30 Zeilen zu je 60 Anschlägen) umfassen. Kurzbeiträge (s. msr, Berlin 23 (1980) 11, S. 651), die der schnellstmöglichen Bearbeitungsfrist unterliegen, sind umfangsmäßig auf 3 Schreibmaschinenseiten, maximal 2 Bilder oder Tafeln begrenzt. Beiträge für den Rubrikenteil sind im Normalfall sehr viel kürzer und sollen zweizeilig bei 30 Zeilen zu je 39 Anschlägen geschrieben sein. Für Buchbesprechungen gilt als Richtwert ein Umfang von etwa 50 Zeilen je Rezension.

- Jeder Autor hat seinem Beitrag eine Kurzvorstellung mit seinem beruflichen Werdegang beizulegen. Benötigt werden folgende Angaben: Name, Vorname, Alter, Titel, Studium (Fachrichtung, Bildungseinrichtung, Zeitraum), weitere wissenschaftliche Qualifikationen (Dissertationen u. ä.) mit Abschlußdatum, Arbeitsstellen nach dem Studium, jetzige Dienststellung.

- Der Beitrag ist nach der Zehnernumerierung zu gliedern [(Vorspann), 0. Einleitung, 1. ..., 2. ..., 3. ..., 3.1. ..., 3.2. ..., 4. ..., usw., Zusammenfassung].

- Die Literaturzusammenstellung soll auf einem Extrablatt erfolgen.

Beispiele:

[1] *Schacke, P.*; *Sfax, E.*: Ein Spannungs-Frequenz-Wandler. msr, Berlin 10 (1967) 3, S. 97–101.
[2] *Solodownikow, W. W.*: Bauelemente der Regelungstechnik. Bd. II. Korrektur- und Rechenglieder. Berlin: VEB Verlag Technik 1963.

Bei der Wiedergabe fremdsprachiger (außer englischer) Literaturstellen bitte Autor und Originaltitel transliterieren und zusätzlich den Originaltitel ins Deutsche übersetzen.

- Die Zusammenstellung der Bildunterschriften („Bild", nicht „Abb." oder „Figur") soll auf einem Extrablatt erfolgen. Die Tafelüberschriften („Tafel", nicht „Tabelle" oder „Aufstellung") müssen nicht extra ausgewiesen werden.

- Die Zusammenstellung der Fußnoten ist, mit $^{1})$ beginnend, auf ein Extrablatt zu schreiben (außerdem muß die entsprechende Fußnote auf der betreffenden Textseite aufgeführt werden).

- Für Beiträge im Aufsatzteil ist eine etwa 8zeilige Zusammenfassung für den Inhaltsstreifen beizufügen.

- Hinsichtlich der Schreibweise, vornehmlich auch bei Abkürzungen, sind ausnahmslos die Richtlinien der jeweils aktuellen Ausgabe des Dudens zu befolgen.

- Besonders sorgfältig sind Symbole und Zeichen (einschließlich Indizes, Exponenten, Klammern usw.) in den mathematischen Gleichungen, chemischen Formeln usw. darzustellen. Es ist durchgängig das Internationale Einheitensystem (SI) zu verwenden. Bei griechischen Buchstaben (Buchstabenbild laut Duden) und anderen Zeichen, die zu Verwechslungen führen können, ist die Benennung mit Bleistift in Doppelklammern darüber-
((Ny))
zuschreiben [z. B. ν]. Doppel- oder Mehrfachindizes bzw. -exponenten sind in einer Zeile darzustellen.

- Vektoren (Kleinbuchstaben) sowie Matrizen und Mengen (Großbuchstaben) werden fett gedruckt und sind deshalb vom Autor schwarz zu unterstreichen. Es empfiehlt sich, diese Symbole auf einem Extrablatt gesondert aufzuführen.

- Im Manuskript ist auf eine deutliche Unterscheidung der Buchstaben und Ziffern 1, I, l und o, O, 0 zu achten.

- Es wird darauf orientiert, Beiträge durch Bilder aufzulockern und zu ergänzen. Bilder können Strichzeichnungen oder reproduzierbare Fotos sein. Strichzeichnungen sind nach den einschlägigen Vorschriften, Fachstandards und TGL auszuführen. Dabei sind saubere Bleistiftskizzen (keine Thermokopien) ausreichend, da alle Vorlagen noch einmal umgezeichnet werden. Groß- und Kleinbuchstaben in Bildern sind deutlich zu unterscheiden. In Textstellen in Bildern bitte keine Abkürzungen verwenden.

- Bilder und Tafeln sind mit durchlaufender Numerierung lose beizufügen, also nicht in den laufenden Text einzulegen oder einzukleben. Sie sind mit Schreibmaschine oder Bleistift auf dem linken Manuskriptseitenrand, mit „B 1" (d. h. Bild 1) bzw. „T 1" (d. h. Tafel 1) beginnend, an den Stellen zu markieren, an denen das entsprechende Bild bzw. die Tafel erscheinen soll. Darüber hinaus sind Hinweise auf die Bilder und Tafeln im Text [z. B. (Bild 1)] anzugeben.

- Ganze Worte in Großbuchstaben (Versalien) sind nur in zwingenden Fällen zu verwenden. Dies gilt für Text und Bild.

- Das in der Redaktion redigierte Manuskript wird, falls erforderlich, neu geschrieben. Der Autor erhält eine Kopie der Manuskriptumschrift und Xerokopien der Strichzeichnungen, um Korrekturen bzw. geringfügige Änderungen, die nur zu diesem Zeitpunkt noch möglich sind, mit Farbstift einzutragen.

- Von Beiträgen im Aufsatzteil werden. dem Autor Umbruchabzüge (zweifach) zwecks Korrekturlesung zugesandt. Ein Exemplar der korrigierten Umbruchabzüge ist der Redaktion (nicht der Druckerei!) schnellstmöglich zuzuschicken, da der Zeitraum zwischen Auslieferung der Umbruchabzüge und dem Imprimatur des Heftes durch die Redaktion nur wenige Tage beträgt. Es empfiehlt sich, Korrekturen vorab telefonisch zu übermitteln.

- Der Autor erhält von seinem Beitrag (unverbindlich!) kostenlos je nach Umfang der Arbeit 10 bis 20 Fortdrucke.

- Bemerkungen zum Inhalt der Beiträge:

  An die Beiträge wird die Forderung gestellt, daß sie mit einer aussagefähigen Einleitung und einer informativen Zusammenfassung versehen sind. Die Einleitung soll in verbal verständlicher Weise das Anliegen und die grundsätzliche Aufgabenstellung des Beitrages beinhalten, in der Zusammenfassung werden die markantesten Ergebnisse bei der Lösung der Aufgabenstellung und gegebenenfalls ein Ausblick auf an den Beitrag anknüpfende Problemstellungen aufgeführt. Darüber hinaus wird von jedem Beitrag erwartet, daß er sich um ein hohes Maß an Anwendungsbezogenheit bemüht und die theoretischen Erkenntnisse an praktischen Beispielen illustriert werden.

B. Schennerlein

Automatische Erkennung und Behebung von Prozeßstörungen während der spanenden Bearbeitung durch Funktionserweiterung der Seriensteuerung CNC 600-1

0. Einleitung

Der Anwender von numerischer Steuerungstechnik steht zur Zeit mehr und mehr vor der Aufgabe, den automatischen Ablauf des eigentlichen Bearbeitungsprozesses (Drehen, Bohren, Fräsen) mit Systemkomponenten zu koppeln, die den störungsfreien automatischen Ablauf des Fertigungsprozesses über einen längeren Zeitraum, beispielsweise eine Schicht, gewährleisten.
Die in der DDR angebotenen speicherprogrammierbaren Seriensteuerungen bieten dem Anwender im Lieferzustand jedoch kaum Schnittstellen zur Erweiterung des Funktionsumfanges, um prozeßbegleitende Steuerungsfunktionen (z. B. Prozeßüberwachung, Qualitätskontrolle, Handhabung von Werkstück, Werkzeug, Spannmittel usw.) integrieren zu können.
Im folgenden soll daher eine Steuerungserweiterung der CNC 600-1 beschrieben werden, die es gestattet, sowohl Änderungen im aktuellen NC-Satz vorzunehmen als auch Prozeßstörungen bis zur Bearbeitungswiederaufnahme an der Unterbrechungsstelle automatisch zu beseitigen.

1. Ausgangspunkt

Bisher bekannte Lösungen zur zusätzlichen Integration von Steuerungsfunktionen nutzen entweder die Schnittstelle über die PEAS (programmierbare Eingabe-/Ausgabesteuerung) oder die Implementierung zusätzlicher Programme auf dem Werkstückprogrammspeicherbereich [1]. Hiermit ist allerdings kein Eingriff in den aktuell abzuarbeitenden Satz möglich. Bei einer Reihe von im Prozeßablauf erkannten Störungen ist solch ein Eingriff aber unumgänglich (z. B. Werkzeugbruch, Standzeitende).
Mit der Einbindung eines an der TU Dresden entwickelten Moduls zur Prozeßüberwachung und Werkzeugdiagnose [2] in die CNC 600-1 leiten sich folgende Ziele ab:

1. Rechnerkopplung und Realisierung von Sofortreaktionen im aktuellen NC-Satz
   - Übernahme von Daten nach erkanntem Werkzeugbruch oder Standzeitende
   - steuerungsinterne Verarbeitung dieser Daten
   - Regelung von Arbeitswerten entsprechend der Werkzeugüberwachungsstrategie im aktuellen Satz
   - Hardwarekopplung und Erstellung der zugehörigen Programme
   - Änderung der Leitrechnersoftware
2. Automatische Behandlung von erkannten Prozeßstörungen
   - Rückfahren des schadhaften Werkzeuges
   - Auswahl eines Ersatzwerkzeuges
   - Anfahren der Bearbeitungsunterbrechungsposition
   - Bearbeitungswiederaufnahme
   - Realisierung zusätzlicher Überwachungsfunktionen während des Bearbeitungsstillstandes (z. B. Werkstückmessung).

Der oben genannte an die Steuerung zu koppelnde Modul arbeitet auf der Basis der Spannungskraftmessung mittels Halbleiterdehnmeßstreifen [2]. Dieses Sensorsystem ist in der Lage, über die Erfassung des Verlaufes der Spanungskraftkomponenten sowohl Werkzeugbruch als auch Standzeitende infolge Werkzeugverschleiß zu erkennen.
Im folgenden soll die steuerungstechnische Einbindung dieses Moduls in die CNC 600-1 erläutert werden.

2. Schaffung einer neuen Schnittstelle

Die CNC 600 ist bekanntlich ein Multimikrorechnersystem mit der im Bild 1 dargestellten Blockstruktur. Sie arbeitet auf der Basis des Master-Slave-Prinzips [3], wobei der Leitrechner als Master, Wegesteuerung und PMC (programmable machine control) als Slaves fungieren. Das heißt, jegliche auszutauschende Information zwischen den Rechnern wird zunächst im Leitrechner verarbeitet.
Der Leitrechner kann mit jedem Slave, die Slaves jedoch nur mit dem Master korrespondieren. Der Datenaustausch erfolgt bidirektional, d. h., sowohl Master als auch Slave können sowohl Sender als auch Empfänger von Daten sein.
Für die Kopplung der drei Rechner zum Zweck des Datenaustausches wurde das in [4] ausführlich beschriebene Koppelprinzip über E/A-Schaltkreise gewählt. Hardwaremäßige Voraussetzungen für die Kopplung sind also auf jeder ZVE der drei Rechner ein PIO-Schaltkreis U 855 und eine Zusatzlogik. Der Koppelbus stellt die Hardwareschnittstelle dar.
Für die softwaremäßige Verarbeitung eines Sendewunsches sind die Rechnerkoppelprogramme zuständig, die im Betriebssystem jedes der drei Rechner implementiert sein müssen (Algorithmen der Rechnerkoppelprogramme „Rufausgabe Master/Slave", „Quittungs- bzw. Gesuchauswertung Master/Slave", „Byteeingabe-/Byteausgabe" siehe [4]).
Bevor ein Datenaustausch (dieser erfolgt über Port A) stattfinden kann, müssen sich zwei Rechner am Koppelbus finden. Dieser konstante Anteil der Rechnerkopplung (er benötigt 250 µs) erfolgt über die Auswertung der Einzelbitsignale des Ports B (Bild 2). Der dargestellten Bitbelegung des Ports B/Master ist zu entnehmen, daß bei einer Wortbreite von 8 bit drei Slaverechner koppelbar sind. Da der Leitrechner bisher nur mit zwei Slaves zusammenarbeitet (Wegesteuerung, PMC), ist dies der Ausgangspunkt für die Integration eines K 1520 mit dem oben genannten Modul zur Prozeßüberwachung und Werkzeugdiagnose.
Die Bitbelegung des Ports B nach Einordnung eines dritten Slaves entspricht Bild 3.
Die notwendigen softwaremäßigen Änderungen der Rechnerkoppelprogramme des Leitrechners, um zusätzlich Gesuch oder Quittung eines dritten Slaves zu behandeln, sind ausführlich in [5] beschrieben.
Da es aufgrund fehlender Steckplätze nicht möglich war, den gesamten K 1520 in das Gefäßsystem der CNC 600-1 zu integrieren, wurde eine Koppelkarte zur Verlängerung des Koppelbusses im Steuerschrank angeordnet. Von dieser führt über Steckverbinder die Koppelleitung an eine Adapterkarte des K 1520, mit der die Verbindung zum Koppelbus des dritten Slaves hergestellt wird.
Mit dieser Variante ist der Lieferzustand der CNC 600-1 stets wieder herstellbar.

3. Funktionelle Nutzung der Schnittstelle Leitrechner — 3. Slave

Die erläuterte Einbindung eines 3. Slaves in die Rechnerarchitektur der CNC 600-1, d. h.

- Änderung des Betriebssystems
- Änderung der Generierdaten
- Implementierung der Rechnerkoppelprogramme in den 3. Slave
- Bestückung der Koppelkarte mit entsprechenden Treibern
- Verlängerung des Koppelbusses aus dem Gefäßsystem der CNC 600-1

gestattet es zunächst — unabhängig von der Spezifik der im 3. Slave zu bearbeitenden Prozeßsteueraufgabe —, beliebige Daten zwischen Leitrechner und 3. Slave auszutauschen und in einen definierten Einlesepuffer zu übernehmen. Die zu übertragenden Daten müssen stets vor der Initialisierung einer Rechnerkopplung gemäß Bild 4 zusammengestellt werden.
Inwieweit sich diese Daten für eine gezielte Steuerungsreaktion zu einem definierten Zeitpunkt nutzen lassen, ist abhängig von der Möglichkeit, diese Daten im vorhandenen Steuerungsalgorithmus der Leitrechnersoftware zu verarbeiten. Zu diesem Zweck muß der Programmteil der Statusauswertung (Bestandteil von TMAT [3]) erweitert werden. Hier wird noch vor Abschluß einer Rechnerkopplung entsprechend einem erkannten Statuswortes (1. Byte des übertragenen Datenblocks) ein Reaktionsprogramm in einer Programmebene (Bild 5) angemeldet.

3.1. *Sofortreaktion bei erkannten Prozeßstörungen*

Im Fall der Kopplung des genannten Moduls zur Prozeßüberwachung und Werkzeugdiagnose werden zwei Zielreaktionen notwendig:

Dipl.-Ing. *Barbara Schennerlein* (30) studierte von 1976 bis 1980 Fertigungsprozeßgestaltung an der TU Dresden. Anschließend wissenschaftliche Assistentin mit Spezialisierung auf dem Gebiet NC-Steuerungstechnik. Seit 1986 wissenschaftliche Oberassistentin am Bereich Zentrales CAD/CAM-Labor der Sektion 14 der TU Dresden.

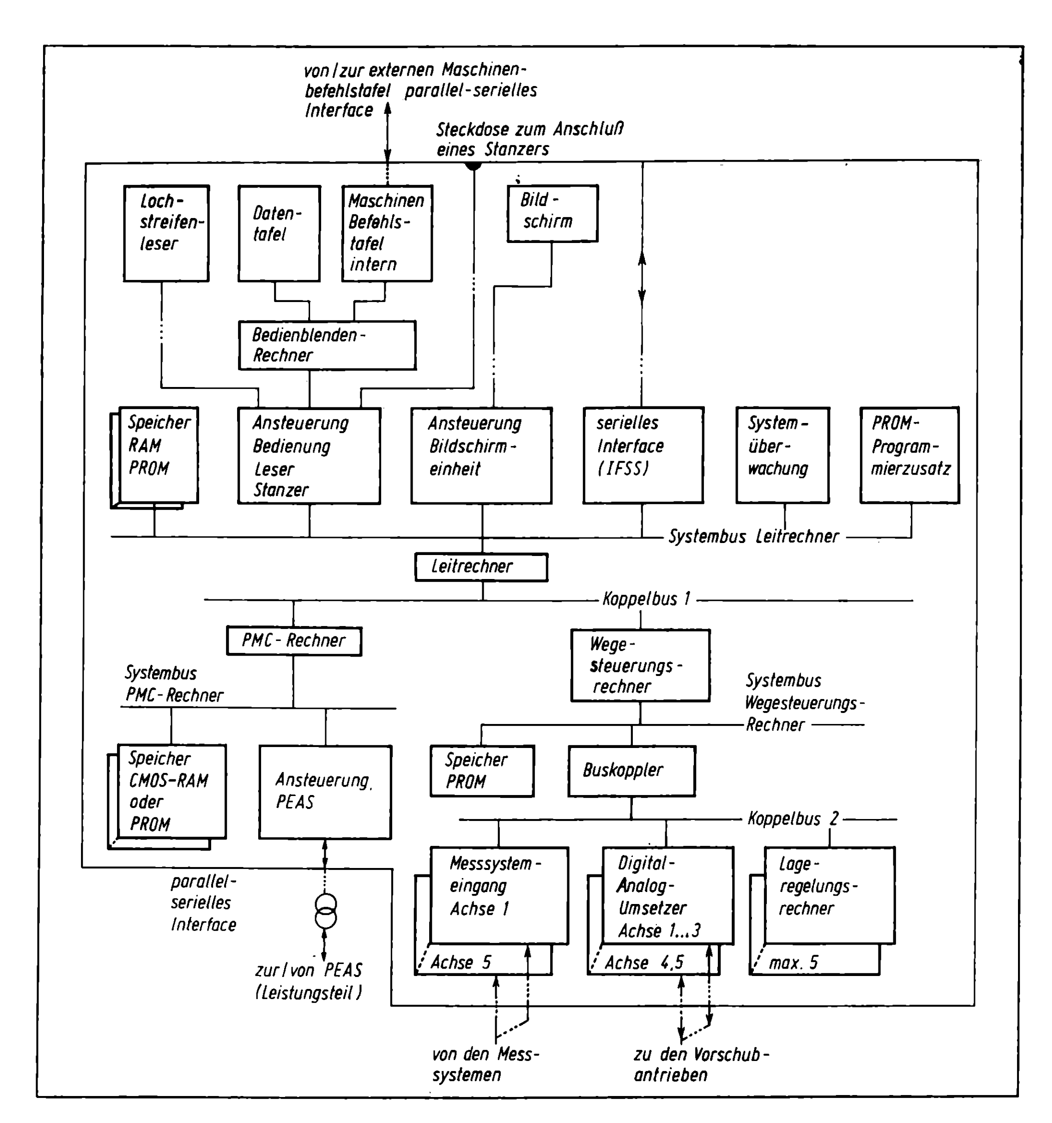


Bild 1. Blockschaltbild CNC 600-1

– sofortiges Stillsetzen des Bearbeitungsprozesses bei erkanntem Werkzeugbruch oder
– Beeinflussung der Arbeitswerte (Vorschub s, Drehzahl n) derart, daß eine Weiterarbeit bei gesicherter Qualität des Werkstückes noch bis zum Ende des aktuellen NC-Satzes möglich wird (Vorausschaustrategie zur Erkennung des Standzeitendes).

Beide Forderungen lassen sich steuerungsseitig durch die Verarbeitung und Aufbereitung eines vom 3. Slave aktualisierten Vorschubes und einer Ausgabe an die Wegsteuerung zur Änderung des aktiv wirkenden Vorschubes realisieren. Der Informationsfluß soll kurz anhand von Bild 6 erläutert werden (die Funktionen der einzelnen Funktionalprogramme der Leitrechnersoftware können aus [3] entnommen werden).
Softwareschnittstelle zwischen Leitrechner und 3. Slave ist ein Übergabeprogramm im 3. Slave (Algorithmus entsprechend Bild 7). Zuvor muß aufgrund der laufenden Auswertealgorithmen „Standzeitendeerkennung“ oder von einer Interruptroutine,

Bild 2. Bitbelegung der E/A-Ports für Master und Slaves (Lieferzustand der CNC 600)

LR Leitrechner; WST Wegesteuerungsrechner; PMC programmable machine control; ZL Zusatzlogik; E Eingabe; A Ausgabe; A/E Ausgabe oder Eingabe ▼

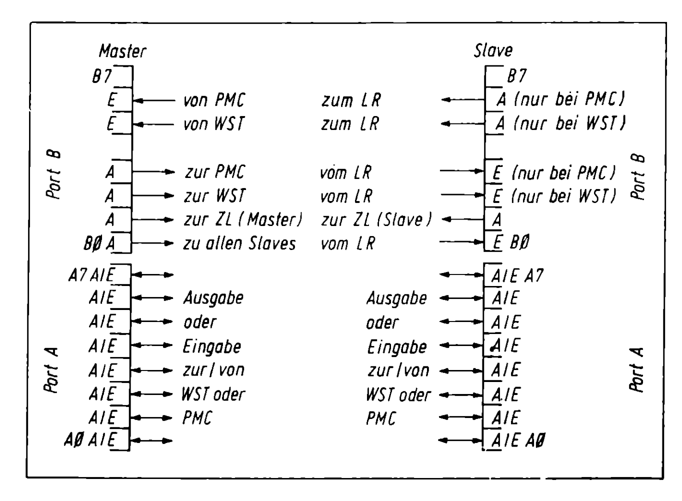


Bild 3. Bitbelegung der E/A-Ports für Master und Slaves nach der Steuerungserweiterung der CNC 600

Bitbelegung von Port A und Bezeichnungen wie im Bild 2

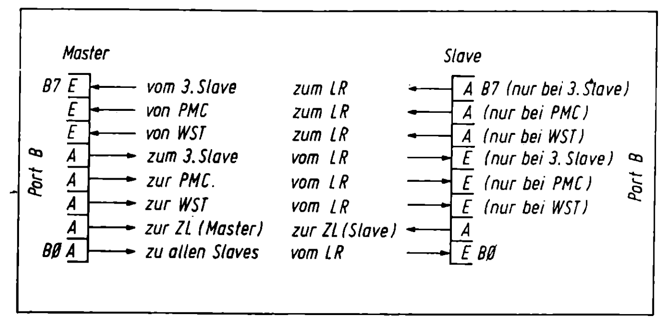
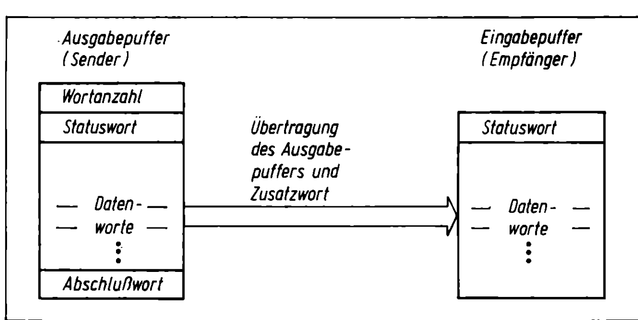


Bild 4. Blockzusammenstellung der zu übertragenden Daten [4]



die nach erkanntem Werkzeugbruch angesprungen wird, der Ausgabepuffer mit einem aktualisierten Vorschubwert beschrieben werden. Nach Aufbau der Rechnerkopplung zwischen 3. Slave und Leitrechner sowie der Übernahme der Daten wird innerhalb der Statusauswertung „STATE" ein Unterprogramm „WSTA2" in der Programmebene 3 angemeldet. Nach Abschluß der Rechnerkopplung erfolgt der Rücksprung nach „IRSP" (Rücksprungprogramm) im Betriebssystem. Bei erneutem Interrupt wird die Abarbeitung der in den drei Programmebenen angemeldeten Reaktionsprogramme initiiert (mittels „BESY" — Testprogramm für angemeldete Programmebene und den zugehörigen Programmteilen „URSP" — Retten der Arbeitsspeicher mit Erst- und Zweitregistersatz sowie „LI/SHIFT" — Listenorganisation).

Das Unterprogramm „WSTA2" ist im Normalfall für die Übergabe eines Vorschubwertes an die Wegesteuerung verantwortlich, wenn über die Maschinentafel die Betätigung des Vorschuboverrideschalters erkannt wurde. Dieses Unterprogramm „WSTA2" wurde dahingehend erweitert, daß eine zusätzliche Verrechnung mit einem vom 3. Slave übertragenen Vorschubwert erfolgt. Dieser kann sowohl $s = 0$ betragen als auch einen modifizierten Wert entsprechend dem Standzeitendealgorithmus annehmen und wird im geforderten Zeitraum von 10 ms wirksam.

Der gleiche Informationsfluß gilt für eine Drehzahlregelung (Verrechnung einer aktualisierten Drehzahl n in einem Programm „PMCA2" und Ausgabe dieser an die PMC).

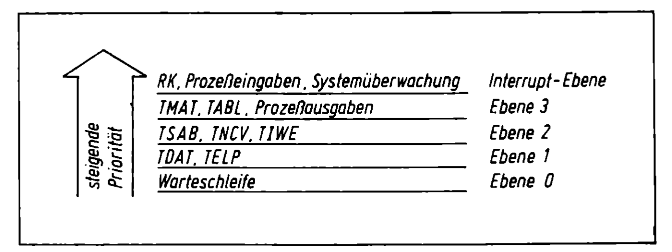


Bild 5. Zuordnung der Funktionalprogramme zu den Programmebenen [3]

Bild 6. Informationsfluß bei Vorschubbeeinflussung vom 3. Slave

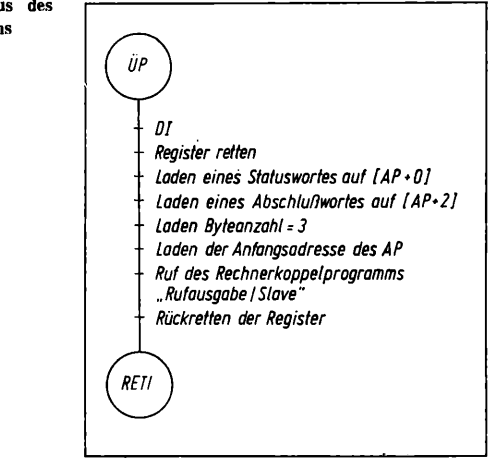
Für ein komplexes Standzeitüberwachungssystem (Zuordnung von Überwachungsgrößen zu den Arbeitsstufen, Aktualisierung des Vorschubes bei Verschleißfortschritt [2]) ist es notwendig, bestimmte Daten vom Leitrechner an den 3. Slave zu übergeben. Das sind sowohl Daten aus dem NC-Programm (Satznummer N, Werkzeug T, Vorschub s, Drehzahl n, programmierte x- und z-Werte) als auch die den aktuellen Bearbeitungsfortschritt kennzeichnenden Daten (x_{ist}, z_{ist}). Diese Daten werden in der entsprechenden Blockzusammenstellung ebenfalls über die erweiterte Rechnerkopplung übertragen, wobei die erstgenannten dem Aktivsatzpuffer des Programmteils „TSAB" — Satzaufbereitung (T Variante Drehen), die aktuellen x- und z-Koordinaten dem Bildschirmabbildspeicher des Leitrechners zu entnehmen sind.

3.2. *Automatische Bearbeitungswiederaufnahme an der Unterbrechungsstelle*

Über die unter Abschn. 3.1. beschriebene Regelung der technologischen Stellgrößen s und n können Prozeßstörungen vorausschauend verhindert werden. Eine Steuerung für die bedienarme

Bild 7. Algorithmus des Übergabeprogramms

AP Ausgabepuffer



- **Allgemeine Aufgaben**
  - Algorithmus von TWZW als neues Funktionalprogramm des Leitrechners der CNC 600
- **1 Erkennen von Prozeßstörungen**
  - Modul zur Werkzeugdiagnose
  - Erfassung von Werkzeugbruch oder Standzeitende durch Auswertung von Kraftanstieg, Toleranzband, Zeitabständen usw.
- **2 Auslösen einer Sofortreaktion**
  - Interruptroutine zur Auslösung der Rechnerkopplung 3. Slave - Leitrechner
  - Übergabe s = 0 an Leitrechner, Leitrechner an Wegesteuerung
  - Stillsetzen des Lageregelkreises und Vorschubantriebes
- **3 Retten des NC-Programmzustandes zum Zeitpunkt der Bearbeitungsunterbrechung**
  - Umspeichern des Aktivsatzpuffers (Retten von N, T, x_{soll}, z_{soll}, G, M, L, s, n)
  - Abspeichern der von der Wegesteuerung rückgemeldeten x_{ist} -und z_{ist} -Koordinaten aus dem Schirm-Bildspeicher des Leitrechners
  - Korrektur von x_{ist}, z_{ist} zur Vermeidung von Marken beim Wiederanfahren
- **4 Ermittlung und Ausführung eines oder einer Folge von Reaktionsprogrammen**
  - Rückfahren des Werkzeuges an Werkzeugwechselpunkt
    - Ermitteln der WZ-Schneidenradiuslage
    - Endpunktkoordinaten der Sätze N-1 und N (x_{soll}, z_{soll})
    - Ermitteln der Abheberichtung
    - Generierung der Sätze zum Zurückziehen des WZ an definierten WZW-Punkt gemäß o.g. Bedingungen
    - Schalten des WZ-Revolvers in WZW-Position
  - Einwechseln eines neuen Werkzeuges
    - Neubelegung der Korrekturwertschalter
    - Test der Anzahl der ausgeführten Werkzeugwechsel
  - Aufruf eines zusätzlichen Überwachungsprogramms (oder nach definiertem Abschluß einer Arbeitsstufe)
    - Aktivierung einer Meßroutine für das Werkstück über Rechnerkopplung mit 3. Slave
    - Fahrbewegung über neuen M-Befehl an PMC
    - Übergabe x_{ist}, z_{ist} an 3. Slave
    - Verrechnung der Koordinatenwerte
    - Übergabe neuer Korrekturwerte für Korrekturschalterbelegung an Leitrechner
- **5 Herstellen des Zustandes vor Bearbeitungsunterbrechung**
  - Generierung der Sätze zum Anfahren der Bearbeitungsunterbrechungsposition mit eingewechseltem Werkzeug (gemäß Rückzugsbewegung)
  - Aktualisierung der Informationen aus dem geretteten Aktivsatzpuffer

Bild 8. Steuerungsaufgaben für eine automatische Störungsbehandlung bis zur Bearbeitungswiederaufnahme an der Unterbrechungsstelle

Fertigung muß nach erkannter Prozeßstörung und Sofortreaktion im aktuellen NC-Satz (s, $n = 0$) der zusätzlichen Forderung genügen, ein notwendig auf die Prozeßstörung folgendes Reaktionsprogramm einzuleiten, um den störungsfreien Bearbeitungsablauf an der Unterbrechungsstelle ohne Bedienereingriff wieder aufnehmen zu können.
Bei einer automatischen Beseitigung von Prozeßstörungen sind insbesondere Eingriffe in das Funktionalprogramm „TSAB" notwendig. Die bisher starre Folge der Informationsaufbereitung des NC-Programmes „Einlesepuffer — Vorbereitungssatzpuffer — Aufbereitungssatzpuffer — Aktivsatzpuffer" muß an die Behandlung nicht programmierter Zustände aufgrund von Prozeßunterbrechungen angepaßt werden. Für den Fall eines Werkzeugschadens ist in die Struktur der Leitrechnersoftware CNC 600-1 ein neu entwickeltes Funktionalprogramm „TWZW" eingeordnet worden. Bild 8 zeigt die allgemeingültigen Steuerungsaufgaben für eine automatische Störungsbehandlung und ordnet diesen den speziellen Algorithmus des genannten Programmes „TWZW" zu. Nachdem die Rückfahrbewegung des verschlissenen oder gebrochenen Werkzeuges über Ermittlung der Werkzeugschneidenradiuslage und Verrechnung der x- und z-Koordinaten des Satzes $N - 1$, d. h. des Satzes, der vor Bearbeitungsunterbrechung vollständig abgearbeitet wurde, und des aktuellen Satzes N ermittelt wurde, über die Satzaufbereitung „TSAB" diese Sätze generiert und ausgeführt wurden, erfolgt ein Schwenken des Werkzeugrevolvers in Wechselposition. Als nächstes wird ein unbedingter Halt erkannt und ausgeführt. Bis zur Neuaktivierung von „TWZW" können neben dem notwendigen Einwechseln eines ausgewählten Ersatzwerkzeuges weitere Reaktionen initiiert werden, z. B.:

- Aufruf der Rechnerkopplung Leitrechner — 3. Slave und Auslösung einer Werkstückmessung
- Verrechnung von Korrekturwerten aufgrund der Werkstückmessung
- Anforderung der Werkzeugkorrekturwerte des Ersatzwerkzeuges vom DNC-Rechner
- Kopplung mit einer Handhabesteuerung zum Einwechseln des Ersatzwerkzeuges auf eine definierte Werkzeugposition.

Nach Neuaktivierung von „TWZW" werden als nächstes NC-Zeichen T erkannt, die erweiterte Werkzeugbehandlungsroutine in der Satzaufbereitung „TSAB" angesprungen, die neuen Korrekturwerte auf den aktuellen Korrekturschalteraufruf übernommen, der Werkzeugbefehl aktualisiert und die Sätze zum Rückfahren an die Unterbrechungsstelle generiert und ausgeführt.
Die Zusammenstellung der NC-Zeichen für die Aktivierung der Rückfahrbewegung an den Werkzeugwechselpunkt bzw. Wiederanfahrbewegung des Werkzeugs an die Unterbrechungsstelle am Werkstück erfolgt nach einer der im Bild 9 dargestellten 9 Varianten.
Um Marken im Werkstück zu verhindern, ist die Bearbeitungswiederaufnahmeposition nicht völlig identisch mit der Bearbeitungsposition bei Prozeßunterbrechung. Sie entspricht einem korrigierten Wert der zuvor gespeicherten x_{ist}- und z_{ist}-Koordinaten. Diese Korrektur leitet sich aus der Tatsache ab, daß die Übertragung der x_{ist}- und z_{ist}-Werte von der Wegesteuerung an den Leitrechner alle 60 ms erfolgt und der maximal programmierbare Vorschub 9999,99 mm/min beträgt.
Nachdem der unterbrochene Satz mit sämtlichen programmierten NC-Zuständen aktiviert wurde (Programmzustand „TSAB" wie vor Bearbeitungsunterbrechung), kann die Bearbeitung des aktuellen NC-Programmes fortgesetzt werden.

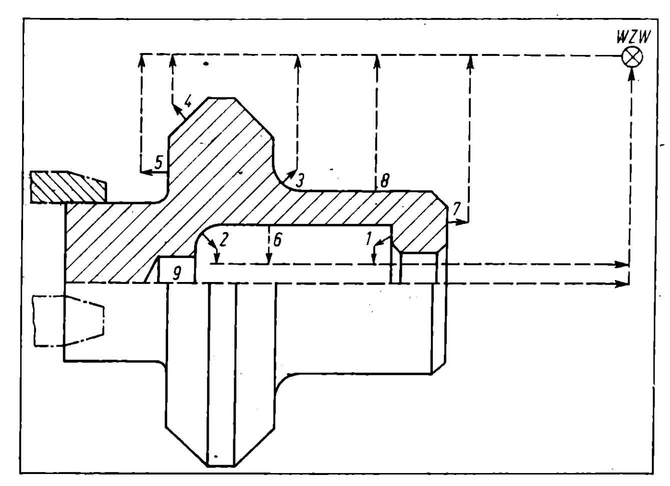


Bild 9. Mögliche Abheberichtungen des Werkzeugs

Zusammenfassung

Der Beitrag befaßt sich mit einer Lösung zur Funktionserweiterung einer in der DDR verfügbaren Seriensteuerung. Das vorgestellte Prinzip der Kopplung eines 3. Slaverechners an den Leitrechner der CNC 600-1 gestattet es erstmalig, sowohl aktuelle Prozeßdaten zu gewinnen als auch diese zur Änderung von Steuerdaten im aktuellen NC-Satz zu nutzen.
Am Beispiel der funktionellen Kopplung eines Moduls zur Prozeßüberwachung und Werkzeugdiagnose wird gezeigt, wie vorausschauend Prozeßstörungen verhindert werden können. Bei erkannter Prozeßstörung (Werkzeugschaden) und dem automatischen Stillsetzen des Bearbeitungsprozesses durch Stillsetzen des Lageregelkreises ($s = 0$) kann durch die Integration des neu entwickelten Funktionalprogrammes „TWZW" in die Leitrechnersoftware die Prozeßstörung ohne Bedienereingriff bis zur Bearbeitungswiederaufnahme an der Unterbrechungsstelle behoben werden.
Diese Steuerungserweiterung ist anwendbar auf alle speicherprogrammierbaren Steuerungstypen, die ihre Rechnerkopplung über E/A-Schaltkreise organisieren.
Der Inhalt der Veröffentlichung zur automatischen Behebung von Prozeßstörungen ist als Wirtschaftspatent mit dem Aktenzeichen WP G 05 B/283 7863 beim Amt für Erfindungs- und Patentwesen angemeldet.

Literatur

[1] *Wolf, H. J.; Reinhold, G.; Drechsler, N.; Steffen, W.:* Realisierung einer Meßvariante mit adaptiver Korrektur und anderen Automatisierungsfunktionen an einer Fertigungseinheit DF2-CNC 600/IR2-IRS 600. Fertigungstechnik und Betrieb, Berlin 34 (1984) 7.
[2] *Hentschel, B.; Stange, B.:* Konstruktive und technologische Grundlagen der Sensorentwicklung und Werkzeugüberwachung beim Drehen. Forschungsbericht (unveröffentlicht) TU Dresden, Sektion 14, 1984.
[3] Systembeschreibung CNC 600. Lehrgangsmaterial des VEB Numerik „Karl Marx".
[4] *Kehrer, E.; Wollenberg, G.:* Multimikrorechnerkopplung über Ein- und Ausgabeports. rfe, Berlin 29 (1980) 8, S. 489–494.
[5] *Schennerlein, B.:* Steuerungserweiterung der CNC 600 durch Schaffung einer universell nutzbaren Schnittstelle und Konzeption deren funktioneller Nutzung. Forschungsbericht (unveröffentlicht). TU Dresden, Sektion 14, 1985.

msr 8504

H.-R. Breitmoser

Ein nichtdispersives Modell zur Berechnung des Meßfehlers eines NDIR-Fotometers für Differenzmessungen

0. Einleitung

Nichtdispersive Infrarot-Fotometer (NDIR-Fotometer) sind Meßgeräte zur Messung des Volumenanteils c einer Meßkomponente. Das Übertragungsverhalten des Fotometers wird durch unterschiedliche Störgrößen und gerätebedingte Driften beeinflußt. Für den Nutzer eines NDIR-Fotometers ist die Änderung des Übertragungsverhaltens des Fotometers als Ganzes von Interesse: der Fotometerfehler. Ein Hersteller gibt für sein NDIR-Fotometer i. allg. aber nur die Werte der einzelnen Störgrößen und gerätebedingten Driften für ein bestimmtes Zeitintervall (z. B. 24 h) an.

Die Berechnung des maximalen Fotometerfehlers e_F ist mit Hilfe des Gaußschen Fehlerfortpflanzungsgesetzes aus diesen Einflußgrößen e_i möglich:

$$e_F(c) = \sum_i \left| \frac{\partial c}{\partial e_i} \delta e_i \right| . \tag{1}$$

Dabei ist $c = c(x, e_i)$ die inverse Funktion zur Kennlinienfunktion $x = x(c, e_i)$. Die Voraussetzung zur Anwendung von (1) ist eine partiell differenzierbare Darstellung der inversen Kennlinienfunktion. Diese kann für das NDIR-Fotometer in ausreichender Näherung abgeleitet werden. Sie muß alle die Modellgrößen enthalten, auf die die wesentlichen Komponenten des Fotometerfehlers zurückgeführt werden.

1. Ein nichtdispersives NDIR-Fotometermodell

In der nichtdispersiven Betrachtungsweise erfolgt keine spektrale Auflösung der Transmission. Hier wird das Lambert-Beersche Gesetz mit einem empirisch ermittelten, integralen Absorptionskoeffizienten $\bar{\varepsilon}$ verwendet. Damit ergibt sich ein nichtdispersives Modell in der allgemeinen Form zu

$$x = vT_F \left| J_M \exp(-\bar{\varepsilon} l \varrho_M c_M) - J_V \exp(-\bar{\varepsilon} l \varrho_V c_V) \right| . \tag{2}$$

Das NDIR-Fotometerausgangssignal x wird der Transmissionsdifferenz zwischen Meß- und Vergleichsküvette proportional gesetzt. Der Proportionalitätsfaktor ist der Übertragungsfaktor v. Die IR-Strahlung wird über die Gewichtsfaktoren J_M und J_V berücksichtigt. Dabei sind T_F die Küvettenfenstertransmission für den durchlässigen Bereich, l die Küvettenlänge, c_M und c_V die Meßkomponentenvolumenanteile in der Meß- und der Vergleichsküvette und ϱ_M, ϱ_V die Dichten der unverdünnten Meßkomponenten unter den Zustandsbedingungen der Küvetten

$$\varrho = \varrho_0 \frac{p \cdot T_0}{p_0 \cdot T} \tag{3}$$

mit ϱ_0 als Dichte unter den Normbedingungen $T_0 = 273{,}15$ K und $p_0 = 1013$ hPa.

(2) kann in eine auf Differenzmessungen angepaßte Form gebracht werden. In dieser ist die Absolutmessung als Spezialfall mit $c_V = 0$ enthalten. Sie ergibt sich mit $\Delta J = J_M - J_V$, $\Delta T = T_M - T_V$, $\Delta p = p_M - p_V$, $\Delta c = c_M - c_V$, der linearen Näherung $\exp(-\bar{\varepsilon} l \varrho \Delta c) \approx 1 - \bar{\varepsilon} l \varrho \Delta c$ und der Bedingung $\Delta p \ll p$, $\Delta T \ll T$:

$$x = vT_F \left| J_V \exp(-\bar{\varepsilon} l \varrho c_V) \left[\frac{\Delta J}{J_V} - \frac{J_V + \Delta J}{J_V} \bar{\varepsilon} l \varrho \times \left(\Delta c + \left(\frac{\Delta p}{p_V} - \frac{\Delta T}{T_V} \right) c_V \right) \right] \right| . \tag{4}$$

Die Betragsbildung repräsentiert die Gleichrichtung des vom Strahlungsempfänger abgenommenen Meßsignals. Zur Gewährleistung eines eindeutigen Zusammenhangs $x = x(\Delta c)$ muß verhindert werden, daß der Term innerhalb der Betragsstriche durch den Nullpunkt geht. Die Messung positiver und negativer Differenzen erfordert aus diesem Grund die Verstimmung der Betragsblende ($\Delta J \neq 0$). Für eine direkte Proportionalität zwischen Δc und x muß die Blende einen Teil des Meßstrahlengangs abdecken, d. h. $\Delta J < 0$. Unter diesen Einschränkungen wird der Betragsoperator zum (-1)-Operator.

Der Einfluß von Druck- und Temperaturdifferenzen zwischen Meß- und Vergleichsküvette auf das Ausgangssignal in Abhängigkeit von c_V, der bereits in [2] diskutiert wurde, ist aus (4) gut erkennbar. Durch geeignete konstruktive Maßnahmen können $\Delta T = 0$ und $\Delta p = 0$ gewährleistet werden. Damit vereinfacht sich (4) zu

$$x = vT_F J_V \exp(-\bar{\varepsilon} l \varrho c_V) \left[\frac{J_V + \Delta J}{J_V} \bar{\varepsilon} l \varrho \Delta c - \frac{\Delta J}{J_V} \right] . \tag{5}$$

Die Empfindlichkeit gegenüber der Meßkomponente ist

$$E = \frac{\partial x}{\partial \Delta c} , \tag{6}$$

$$E = vT_F J_V \exp(-\bar{\varepsilon} l \varrho c_V) \frac{J_V + \Delta J}{J_V} \bar{\varepsilon} l \varrho . \tag{7}$$

Unter Berücksichtigung von (7) wird aus (5)

$$x = E \Delta c - \frac{E}{\bar{\varepsilon} l \varrho} \frac{\Delta J}{J_V + \Delta J} . \tag{8}$$

Die zur Anwendung von (1) benötigte inverse Funktion von (8) lautet:

$$\Delta c = \frac{x}{E_c} \frac{\Delta J}{J_V + \Delta J} \frac{1}{\bar{\varepsilon} l \varrho} . \tag{9}$$

2. Rückführung wesentlicher Einflußgrößen auf Modellgrößen

Das nichtdispersive Fotometermodell wird durch (9) und (7) dargestellt. Für seine Anwendung zur Berechnung des Fotometerfehlers muß eine Rückführung der wesentlichen Einflußgrößen des Fotometerübertragungsverhaltens auf die im Modell enthaltenen Größen erfolgen.

2.1. *Temperatur und Druck*

Als Meßeffekt wird im NDIR-Fotometer die Abhängigkeit der Strahlungsabsorption von der Massekonzentration c_m der Meßkomponente ausgenutzt. Die Massekonzentration ist im Gegensatz zum Volumenanteil temperatur- und druckabhängig

$$c_m = \varrho_0 \frac{pT_0}{p_0 T} c . \tag{10}$$

Darüber hinaus führen Temperatur- und Druckänderungen in den Fotometerküvetten zu Änderungen der Absorptionslinienbreite. Bei der CO_2-Messung in atmosphärischer Luft wurde bei Druckerhöhungen eine um etwa 30% höhere Anzeige ermittelt als durch die Änderung der Massekonzentration mittels (10) erklärbar ist [2]. Weiterhin führen Temperaturänderungen zu erheblichen Änderungen des Strahlungsempfängerübertragungsfaktors [3].

Temperaturschwankungen des optischen Systems können als vernachlässigbar angesehen werden, wenn eine geräteinterne Thermostatisierung vorhanden ist und starke Temperaturänderungen im Aufstellraum des Fotometers vermieden werden.

Für die Fehlerrechnung ist die Berücksichtigung der Luftdruckschwankungen auf die Dichte (3) ausreichend

$$\frac{\delta \varrho}{\varrho} = \frac{\delta p}{p} . \tag{11}$$

2.2. *Netzspannung und Netzfrequenz*

Die Rückführung von Netzspannungs- und Netzfrequenzänderungen auf Änderungen der Modellgrößen ist sehr stark von der elektronischen Schaltungstechnik des Fotometers abhängig.

Die IR-Strahlungsmodulation erfolgt bei den NDIR-Fotometern üblicherweise über ein durch einen Synchronmotor angetriebenes Blendenrad. Wenn die Modulationsfrequenz netzfrequenzunabhängig ist, kann die Netzfrequenz f als Einflußgröße vernachlässigt werden. Ist sie netzfrequenzabhängig, so schwankt sie mit der Netzfrequenz. Die nachfolgende elektronische Bandpaßfilterung der Grundwelle im elektronischen Verstärker folgt den Frequenzänderungen nicht, so daß sich dann der Übertragungsfaktor des Bandpaßfilters für die Grundwelle und damit

---

Dr. rer. nat. *Hans-Rainer Breitmoser* (32) studierte von 1975 bis 1980 an der Sektion Physik/Elektronik der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald. Seit 1980 wissenschaftlicher Mitarbeiter im Forschungszentrum für Bodenfruchtbarkeit Müncheberg der AdL der DDR. 1985 Promotion A.

der Übertragungsfaktor v ändern:

$$\frac{\delta v_1}{v} = \frac{\delta f}{f} \cdot k_1 . \tag{12}$$

Netzspannungsänderungen δU verursachen Änderungen der IR-Strahlerdichte δJ_V

$$\frac{\delta J_V}{J_V} = \frac{\delta U}{U} \cdot k_2 . \tag{13}$$

Dabei sind k_1 und k_2 geräteabhängige Konstanten, die aus dem Datenblatt zu entnehmen sind.

2.3. Gerätebedingte Nullpunkt- und Empfindlichkeitsdrift

Die Hauptursache für die gerätebedingte Drift des Nullpunktausgangssignals sind Schwankungen $\delta \Delta J$ in der Differenz der IR-Strahlungsenergiedifferenz. Die gerätebedingte Nullpunktdrift für eine bestimmte Zeitspanne wird als reduzierter Fehler angegeben, aus dem sich für einen vorgegebenen Meßbereich der absolute Meßfehler e_{NPD} berechnen läßt. Aus (5) ergibt sich mit $x = 0$

$$\frac{\delta \Delta J}{J_V} = \frac{e_{NPD} \bar{\varepsilon} l \varrho}{1 - e_{NPD} \bar{\varepsilon} l \varrho} . \tag{14}$$

Die gerätebedingte Empfindlichkeitsdrift δE wird bei Thermostatisierung im wesentlichen durch Undichtheiten des Strahlungsempfängers hervorgerufen, da diese zu Veränderungen der Füllgaszusammensetzung führen

$$\frac{\delta v_2}{v} = \frac{\delta E}{E} . \tag{15}$$

2.4. Meßkomponentenvolumenanteilschwankungen in der Vergleichsluft

Eine nur bei Differenzmessungen zu berücksichtigende Einflußgröße sind Schwankungen δc_V des Meßkomponentenvolumenanteils in der Vergleichsluft. Sie entsteht durch die nichtlineare Abhängigkeit der IR-Strahlungsabsorption vom Volumenanteil.

3. Berechnung des Fotometerfehlers

Die bei der Berechnung des Fotometerfehlers berücksichtigten Einflußgrößen werden durch die Modellgrößen ϱ, v, J_V, ΔJ und c_V erfaßt. Wenn sie für die e_i in (1) eingesetzt werden, ergeben sich unter Nutzung von (9) für die einzelnen Summanden:

$$\frac{\partial \Delta c}{\partial \varrho} \delta \varrho = \left[- \frac{x}{E_c} (1 - \bar{\varepsilon} l \varrho c_V) - \frac{\Delta J}{J_V + \Delta J} \frac{1}{\bar{\varepsilon} l \varrho} \right] \frac{\delta \varrho}{\varrho} , \tag{16}$$

$$\frac{\partial \Delta c}{\partial v} \delta v = - \frac{x}{E_c} \frac{\delta v}{v} , \tag{17}$$

$$\frac{\partial \Delta c}{\partial J_V} \delta J_V = \left[- \frac{x}{E_c} - \frac{\Delta J}{J_V + \Delta J} \frac{1}{\bar{\varepsilon} l \varrho} \right] \frac{\delta J_V}{J_V + \Delta J} , \tag{18}$$

$$\frac{\partial \Delta c}{\partial \Delta J} \delta \Delta J = \left[- \frac{x}{E_c} + \frac{J_V}{J_V + \Delta J} \frac{1}{\bar{\varepsilon} l \varrho} \right] \frac{\delta \Delta J}{J_V + \Delta J} , \tag{19}$$

$$\frac{\partial \Delta c}{\partial c_V} \delta c_V = \frac{x}{E_c} \bar{\varepsilon} l \varrho \, \delta c_V . \tag{20}$$

4. Anwendung bei der CO_2-Volumenanteildifferenzmessung

Zur Messung der CO_2-Austauschrate von Pflanzenbeständen nach mikrometeorologischen Verfahren besteht die Aufgabe, CO_2-Profile über Pflanzenbeständen zu erfassen [4]. Diese Meßaufgabe läßt sich auf die CO_2-Volumenanteildifferenzmessung zurückführen. Die Differenzen sind zum überwiegenden Teil kleiner als 5 ppm. Das Meßgut atmosphärische Luft hat einen mittleren CO_2-Absolutvolumenanteil von etwa 330 ppm, der in der Nähe von photosynthetisch aktiven Pflanzenbeständen von 280 bis 500 ppm schwanken kann.
Zur Lösung dieser Meßaufgabe sollte ein Infralyt 4 (VEB Junkalor Dessau [5]) genutzt werden. Der kleinste CO_2-Meßbereich, für den seitens des Herstellers noch die angegebenen Meßfehlergrenzen garantiert werden, ist der Absolutmeßbereich 0 bis 60 ppm. Dem entspricht eine Empfindlichkeit von 0,33 mA · · ppm^{-1}. Bei CO_2-Differenzmessungen verkleinert sich die Empfindlichkeit durch einen CO_2-Absolutvolumenanteil von $c_V =$ = 370 ppm gegenüber $c_V = 0$ auf 54% (Bild 1). Zur Erzielung einer Auflösung von 0,1 ppm, die durch das Ausgangssignalrauschen begrenzt wird, muß die Empfindlichkeit mindestens um den Faktor 2 erhöht werden, um auch für die Differenzmessung $E = 0{,}33$ mA · ppm^{-1} zu erreichen.
Zur Analyse der Bedingungen, unter denen die angegebene Meßaufgabe gelöst werden kann, wurde das weiter oben abgeleitete Fotometerfehlermodell eingesetzt. Dazu war es erforderlich,

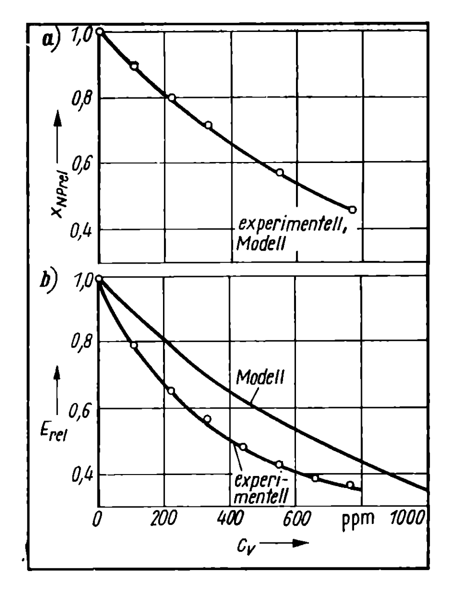


Bild 1. Vergleich der Darstellung der c_V-Abhängigkeit durch das Modell ($\bar{\varepsilon} = 2400$ m^2 × × kg^{-1}) mit experimentellen Werten
a) Nullpunktausgangssignal $x_{NP\,rel}$;
b) Empfindlichkeit E_{rel}

Tafel 1. Einfluß- und Modellgrößenveränderungen für ein 24-h-Intervall

Einflußgröße	Wert	Modellgröße	Wert
δp	10 hP	$\frac{\delta \varrho}{\varrho}$	0,01
$\frac{\delta f}{f}$	0,01	$\frac{\delta v_1}{v}$	0,005
$\frac{\delta U}{U}$	0,05	$\frac{\delta J_V}{J_V}$	0,003
e_{NPD}	0,6 ppm	$\frac{\delta \Delta J}{J_V}$	0,0006
$\frac{\delta E}{E}$	0,03	$\frac{\delta v_2}{v}$	0,03
δc_V	100 ppm	δc_V	100 ppm

den mittleren Absorptionskoeffizienten $\bar{\varepsilon}$ experimentell zu bestimmen. Er wurde über die Abhängigkeit des verstimmten Nullpunktes und der Empfindlichkeit des Infralyt 4 vom CO_2-Absolutvolumenanteil c_V ermittelt. Für $\bar{\varepsilon} = 2400$ $m^2 \cdot kg^{-1}$ ergab sich eine gute Übereinstimmung des nichtdispersiven Fotometermodells mit den experimentell ermittelten Abhängigkeiten (Bild 1). Dieser experimentell ermittelte Wert ist doppelt so groß wie der aus spektroskopischen Daten ermittelte (vgl. [1]). Mit größeren Volumenanteilen der Meßkomponente wird auch $\bar{\varepsilon}$ noch größer.
Die übliche Maßnahme zur Empfindlichkeitsanpassung eines NDIR-Fotometers ist die Küvettenlängenvariation. Begrenzt wird die maximale Küvettenlänge für eine vorgegebene Meßspanne durch die Nichtlinearität der IR-Absorption vom CO_2-Volumenanteil. Bild 2 zeigt den Einfluß der Küvettenlängenerhöhung auf die Empfindlichkeit in Abhängigkeit von c_V. Die Mindestempfindlichkeit von 0,33 mAppm^{-1} wird durch die Küvettenverlängerung bei $c_V = 370$ ppm nicht erreicht. Daher ist es naheliegend, die Empfindlichkeit durch die Vergrößerung der elektronischen Verstärkung zu erhöhen.
Zur Untersuchung der Auswirkungen der beiden genannten Möglichkeiten zur Empfindlichkeitserhöhung auf den Fotometerfehler wurde dieser unter Zugrundelegung eines 24-h-Kalibrierzyklusses berechnet. Die in der Rechnung verwendeten maximalen Einflußgrößenänderungen und die daraus resultierenden Modellgrößenänderungen sind in Tafel 1 dargestellt. Für

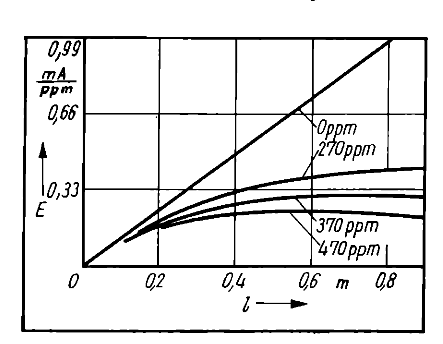


Bild 2. c_V-Einfluß auf die Abhängigkeit der Empfindlichkeit E von der Küvettenlänge l, bezogen auf E = 0,33 mA ppm^{-1} bei $c_V = 0$ und $l =$ = 0,27 m

Tafel 2. Einfluß der Störgrößen auf den Meßfehler des Infralyt 4 für unterschiedliche Einsatzfälle ((D) und (E) mit Interferenzfilter: $T_F = 0{,}74$)

Betrags-blenden-stellung $\frac{\Delta J}{J_V}$	Eingangs-signal $\frac{\Delta c}{\text{ppm}}$	Ausgangs-signal $\frac{x}{\text{mA}}$	Störgrößeneinfluß (in ppm) durch v	J_V	ΔJ	ϱ		Foto-meter-fehler $\frac{e_F}{\text{ppm}}$
(A) Absolutmessung: 0 ... 60 ppm								
		$E = 0{,}33$ mA ppm^{-1}, $l = 0{,}27$ m, $T_F = 0{,}98$						
	0	0	0	0	0,58	0	0	0,6
0	12	4	0,10	0,04	0,57	0,12	0	0,8
	24	8	0,19	0,07	0,56	0,24	0	1,1
(B) Absolutmessung: Vergrößerung der elektronischen Verstärkung auf das 2,5fache gegenüber (A)								
		$E = 0{,}83$ mA . ppm^{-1}, $l = 0{,}27$ m, $T_F = 0{,}98$						
	0	0	0	0	0,58	0	0	0,6
0	12	10	0,10	0,04	0,57	0,12	0	0,8
	24	20	0,19	0,07	0,56	0,24	0	1,1
(C) Absolutmessung: Vergrößerung der Küvettenlänge auf das 2,5fache gegenüber (A)								
		$E = 0{,}83$ mA ppm^{-1}, $l = 0{,}675$ m, $T_F = 0{,}98$						
	0	0	0	0	0,23	0	0	0,2
0	12	10	0,10	0,04	0,22	0,12	0	0,5
	24	20	0,19	0,07	0,22	0,24	0	0,7
(D) Differenzmessung: Vergrößerung der elektronischen Verstärkung auf das 2,5fache gegenüber (A)								
		$E = 0{,}43$ mA ppm^{-1}, bei $c_V = 330$ ppm, $l = 0{,}27$ m, $T_F = 0{,}74$						
	0	0	0	0	0,58	0	0	0,6
0	12	5,2	0,10	0,04	0,57	0,08	1,26	2,0
	24	10,3	0,19	0,07	0,56	0,16	2,52	3,5
	−12	0	0	0,04	0,58	0,12	0	0,7
−0,012	0	5,2	0,10	0	0,57	0,04	1,26	2,0
	12	10,3	0,19	0,04	0,57	0,04	2,52	3,4
	−24	0	0	0,07	0,59	0,24	0	0,9
−0,024	−12	5,2	0,10	0,04	0,58	0,16	1,26	2,1
	0	10,3	0,19	0	0,57	0,08	2,52	3,4
(E) Differenzmessung: Vergrößerung der Küvettenlänge auf das 2,5fache gegenüber (A)								
		$E = 0{,}24$ mA ppm^{-1}, bei $c_V = 330$ ppm, $l = 0{,}675$ m, $T_F = 0{,}74$						
	0	0	0	0	0,24	0	0	0,2
0	12	2,9	0,10	0,04	0,23	0,02	3,15	3,5
	24	5,8	0,19	0,07	0,22	0,03	6,30	6,8
	−12	0	0	0,04	0,24	0,12	0	0,4
−0,030	0	2,9	0,10	0	0,23	0,10	3,15	3,6
	12	5,8	0,19	0,04	0,22	0,09	6,30	6,8
	−24	0	0	0,07	0,24	0,24	0	0,6
−0,059	−12	2,9	0,10	0,04	0,24	0,22	3,15	3,8
	0	5,8	0,19	0	0,23	0,21	6,30	6,9

die Berechnung von $\Delta J \cdot J_V^{-1}$ nach (14) wurden $l = 0{,}27$ m und $\varrho = 1{,}61$ kg m^{-3} verwendet.

In Tafel 2 ist der Fotometerfehler unter verschiedenen Betriebsbedingungen des Infralyt 4 für jeweils drei Eingangssignale dargestellt. Grundlage für die Betrachtungen ist der Absolutmeßbereich 0 ... 60 ppm. Für Absolutmeßbereiche hat die Erhöhung der elektronischen Verstärkung um das 2,5fache keinen Einfluß auf die absoluten Fotometerfehler. Den Einfluß der Küvettenverlängerung auf den Nullpunktfehler widerspiegelt das Fehlermodell mit seiner entsprechenden Verringerung richtig.

Die Untersuchung des Fotometerfehlers für die Differenzmessung, bei der von $c_V = 370$ ppm ausgegangen wurde, erfolgte für jeweils drei verschiedene Betragsblendeneinstellungen. Durch die Küvettenverlängerung wird die erforderliche Mindestempfindlichkeit nicht erreicht. Die Hauptfehlerkomponente ist für diesen Fall der Einfluß der c_V-Schwankungen. Sie ist hier wesentlich größer als bei der entsprechenden Erhöhung der elektronischen Verstärkung. Die Küvettenverlängerung als Maßnahme zur Empfindlichkeitsanpassung ist für diese Art Differenzmessungen nicht geeignet.

Der Einfluß der Betragsblendeneinstellung auf die Abhängigkeit des Fotometerfehlers vom Ausgangssignal ist sehr gering. Hiermit besteht eine Möglichkeit, durch die Betragsblendeneinstellung eine Fotometerfehlerminimierung für einen bestimmten Meßbereich durchzuführen.

Der ermittelte Fotometerfehler ist für die oben dargestellte Meßaufgabe zu groß. Verringerbar ist er durch eine in kurzen Abständen erfolgende zyklische Kalibrierung, durch die die Empfindlichkeit und das Nullpunktausgangssignal bestimmt werden müssen. Zur Empfindlichkeitsbestimmung wurde das Verfahren mit geteilten Küvetten angewendet [6]. Bei 10-min-Intervallen konnte der Fotometerfehler auf kleiner 0,2 ppm für den Meßbereich −5 ... 5 ppm begrenzt werden.

Zusammenfassung

Die Kenntnis des Meßfehlers eines NDIR-Fotometers ist für den Anwender dieser Meßgeräte von großem Interesse, insbesondere dann, wenn nicht standardmäßig vorgesehene Meßaufgaben gelöst werden sollen. Zur Anwendung des Fehlerfortpflanzungsgesetzes für Maximalfehler zur Fotometerfehlerberechnung ist ein partiell differenzierbares Fotometermodell abzuleiten, das alle die Modellgrößen enthält, auf die die wesentlichen Fehlereinflußgrößen zurückgeführt werden können. Dem Fotometermodell liegt das Lambert-Beersche Gesetz zugrunde. Die berücksichtigten Einflußgrößen sind Luftdruck, Netzspannung, Netzfrequenz, gerätebedingte Nullpunkt- und Empfindlichkeitsdrift und für Differenzmessungen noch der Meßkomponenten-Absolutvolumenanteil. Das Fehlermodell wurde auf die Messung kleiner CO_2-Differenzen in atmosphärischer Luft angewendet.

Literatur

[1] *Janac, J.:* The accuracy of the differential measurement of small CO_2 concentration differences with the infra-red analyser. Photosyntetica 4 (1970), pp. 302–308.
[2] *Legg, B. J.; Parkinson, K. J.:* Calibration of infra-red gas analysers for use with carbon dioxide. J. of Physics E. 1 (1968), pp. 1003–1006.
[3] *Gatzmanga, H.; Lux, R.:* Test zur Fehlererkennung in IR-Prozeßanalysatoren. msr, Berlin 24 (1981) 7, S. 382–384.
[4] *Breitmoser, H.-R.:* Ein Meßsystem für mikrometeorologische CO_2-Profilmessungen. Z. Meteorol. (im Druck).
[5] Bedienungsanweisung Infralyt 4. VEB Junkalor Dessau 1979.
[6] *Parkinson, K. J.; Legg, B. J.:* A new method for calibrating infrared gas analysers. J. of Physics E. 4 (1971), pp. 598–600.

msr 8477

Bemerkung zur robusten Nachlaufregelung

0. Einleitung

Die optimale Steuerung von mechanischen Systemen wird oft dadurch erschwert, daß sich während der Bearbeitungsprozesse die Systemparameter ändern.
Abhilfe kann neben der adaptiven Regelung eine robuste Regelung schaffen, z. B. eine Zustandsregelung mit geeigneter Polvorgabe [1] bis [3]. Vermutlich sind diese Verfahren für die robuste Nachlaufregelung im angegebenen Anwendungsfall nur bedingt geeignet. Robustes Verhalten ist bekanntlich auch mit Hilfe einer Strukturumschaltung zu erzielen [4] und [5]. Problematisch ist dabei aber die Tatsache, daß eine geometrische Konstruktion im Zustandsraum nötig ist. Daher wird das Verfahren meist nur auf Systeme 2. Ordnung angewendet. Im vorliegenden Beitrag sollen die Darlegungen von [6] auf Systeme 3. Ordnung erweitert werden.

1. Robuste Regelung

Bild 1 zeigt einen typischen Regelkreis mit den Zustandsgrößen

$$q_1 = x - w\,, \qquad q_2 = \frac{dq_1}{dt}\,, \qquad q_3 = \frac{dq_2}{dt}\,.$$

Der Regelstrecke ist die Zustandsgleichung

$$\frac{d\boldsymbol{q}}{dt} = \boldsymbol{A}\cdot\boldsymbol{q} + \boldsymbol{B}\cdot y$$

zuzuordnen, wobei $\boldsymbol{q} \to \boldsymbol{0}$ bei $x \to w$.
Der Regler ist umschaltbar und wird beschrieben durch

$$y = \begin{cases} -\boldsymbol{K}_{R1}\cdot\boldsymbol{q} & \text{für} \quad u = +1 \\ -\boldsymbol{K}_{R2}\cdot\boldsymbol{q} & \text{für} \quad u = -1 \end{cases}$$

oder

$$\begin{aligned} y &= -\tfrac{1}{2}\,(\boldsymbol{K}_{R1} + \boldsymbol{K}_{R2})\cdot\boldsymbol{q} - \tfrac{1}{2}\,(\boldsymbol{K}_{R1} - \boldsymbol{K}_{R2})\cdot\boldsymbol{q}\cdot u \\ &= -\boldsymbol{K}_m\boldsymbol{q} - \boldsymbol{K}_d\cdot\boldsymbol{q}\cdot u \end{aligned}$$

mit $\boldsymbol{K}_R = (K_R\ 0\ 0)$.
Damit wird die Zustandsgleichung zu

$$\begin{aligned} \frac{d\boldsymbol{q}}{dt} &= (\boldsymbol{A} - \boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{K}_m)\cdot\boldsymbol{q} - \boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{K}_d\cdot\boldsymbol{q}\cdot u \\ &= \boldsymbol{A}_*\cdot\boldsymbol{q} - \boldsymbol{B}_*\cdot\boldsymbol{q}\cdot u\,. \end{aligned}$$

Die Stabilität des Systems ist gegeben, falls für die Ljapunov-Funktion gilt

$$V = \boldsymbol{q}^T\cdot\boldsymbol{R}\cdot\boldsymbol{q} \begin{cases} = 0 & \text{für} \quad \boldsymbol{q} = \boldsymbol{q}_B = \boldsymbol{0} \\ > 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

und

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \boldsymbol{q}^T\cdot(\boldsymbol{A}_*^T\cdot\boldsymbol{R} + \boldsymbol{R}\cdot\boldsymbol{A}_*)\cdot\boldsymbol{q} \\ &\quad - 2\boldsymbol{q}^T\cdot\boldsymbol{B}_*\cdot\boldsymbol{R}\cdot\boldsymbol{q}\cdot u < 0\,. \end{aligned}$$

Damit V möglichst schnell abklingt, sollte der erste Term negativ definit sein und für den zweiten Term gelten

$$s(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{q}^T\cdot\boldsymbol{B}_*\cdot\boldsymbol{R}\cdot\boldsymbol{q} \begin{cases} > 0 & \text{bei} \quad u = +1 \\ < 0 & \text{bei} \quad u = -1 \end{cases}$$

und somit $u = \operatorname{sign} s(\boldsymbol{q})$.
$s(\boldsymbol{q})$ ist also nicht definit und läßt sich demzufolge als Produkt zweier linearer Terme darstellen

$$s(\boldsymbol{q}) = (\sum_i a_i q_i)\cdot(\sum_j b_j q_j)\,.$$

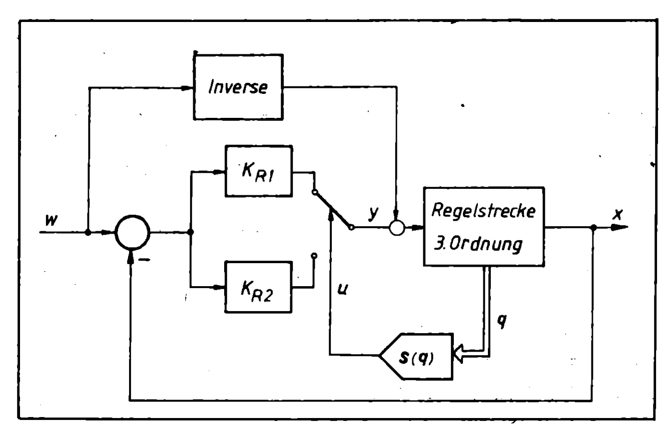
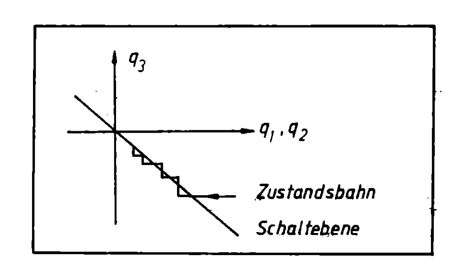


Bild 1. Typischer Regelkreis zur robusten Regelung mit Strukturumschaltung

Bild 2. Wahl der Schaltebene



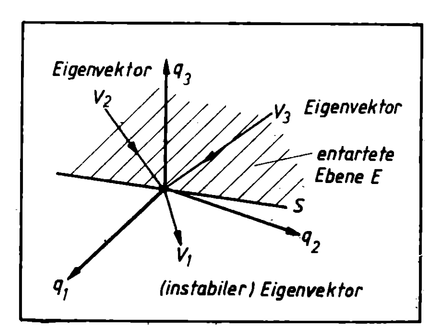
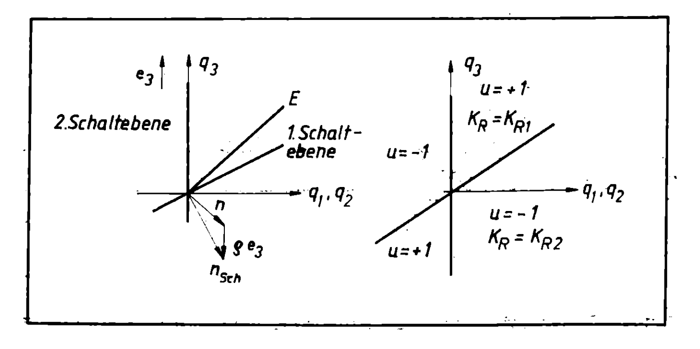


Bild 3. „Entartete" Ebene der stabilen Eigenvektoren

Bild 4. Draufsicht — Gleichung der Schaltebene



Bei $s(\boldsymbol{q}) = 0$, d. h. auf den Hyperebenen $\sum_i a_i q_i = 0$ bzw. $\sum_j b_j q_j = 0$, erfolgt die Umschaltung. Da die Ljapunov-Matrix $\boldsymbol{R}$ in weiten Grenzen beliebig wählbar ist, kann stets eine der beiden Schaltebenen so gewählt werden, daß auf ihr der Vorgang $\boldsymbol{q} \to \boldsymbol{0}$ (d. h. $x \to w$) als Gleitbewegung erfolgt (Bild 2). Dieser Vorgang ist weitgehend unabhängig von den Werten der Regelstreckenparameter. Voraussetzung ist, daß die Zustandsbahnen in vorgegebener Richtung auf die Schaltebene treffen, die für den Gleitvorgang vorgesehen ist. Dies ist mit den Mitteln der analytischen Geometrie leicht zu prüfen [6].

2. Erweiterung für Systeme 3. Ordnung

Bei einem System 3. Ordnung wird man praktisch so vorgehen, daß analog zu [6] $K_R = K_{R1}$ so gewählt wird, daß der Regelkreis instabil wird mit einem positiven und zwei reellwertigen negativen Eigenwerten. Die beiden zugehörigen stabilen Eigenvektoren spannen eine sogenannte „entartete" Ebene auf (Bild 3). Diese Ebene bildet das Ausgangselement für die Konstruktion der Schaltebenen. Bild 4 zeigt die Draufsicht. Wenn die Schnittlinie der entarteten Ebene mit der q_1-q_2-Koordinatenebene die Spur S der Schaltgeraden sein soll (vgl. Bild 3), bekommt man die Schaltebenen mit der Gleichung

$$\boldsymbol{n}_{Sch} = \boldsymbol{n} + \varrho \boldsymbol{e}_3 \,.$$

$\boldsymbol{n}_{Sch}$ Normalenvektor der Schaltebene; $\boldsymbol{n}$ Normalenvektor der entarteten Ebene; $\boldsymbol{e}_3$ Einheitsvektor in Richtung der q_3-Achse

ϱ ist so zu wählen, daß auf einer der beiden Schaltebenen zusammen mit dem gewählten Wert von $K_{R2} > 0$ die Gleitbedingung erfüllt wird. Die Gleichung dieser Schaltebene

$$c_3 q_3 + c_2 q_2 + c_1 q_1 = 0$$

gibt zusammen mit der Definition der Zustandsgrößen die Differentialgleichung des Übergangsvorganges. Da dabei die Parameter der Regelstrecke kaum eine Rolle spielen, hat der Übergang die Eigenschaft der Robustheit bekommen. Wie die Erfahrung zeigt, kann dieser Übergang wesentlich besser sein als beim gleichen Regelkreis ohne Strukturumschaltung. Allerdings können sich Verzögerungen dadurch ergeben, daß die Zustandsbahn auch einmal durch die Spur S läuft und keine Umschaltung bewirkt.

Bei einer Folgeregelung besteht weiterhin die Aufgabe, $x_B = w$ zu gewährleisten, zumindest für einen „einfachen" Verlauf, z. B. $w = a + b \cdot t$. Das ist mit Hilfe einer Führungsgrößenaufschaltung und einer Prozeßinversen zu erreichen [7], wobei diese Inverse auf die Normalwerte der Regelstrecke auszurichten ist. Parameterveränderungen der Regelstrecke bewirken, daß die Übereinstimmung gestört ist und x_B und w nicht mehr übereinstimmen. Dabei rückt der stationäre Zustandspunkt q_B in den Bereich mit $K_{R2} > 0$. Da bei der Strukturumschaltung relativ große Werte von K_{R2} zulässig sind, kann der Betrag von $x_B - w$ wie eine Regelabweichung herabgedrückt werden. Falls diese Abweichung trotzdem noch zu groß ist, kann das Verfahren der Strukturumschaltung nicht verwendet werden. Es wäre dann zu versuchen, ob mit dem Verfahren von *Wostrikow* [8] bessere Resultate zu erzielen sind.

Literatur

[1] *Ackermann, J.*: Entwurfsverfahren für robuste Regelungen. Regelungstechnik 32 (1984) 5, S. 143–150.
[2] *Ackermann, J.*: Abtastregelungen. Band II: Entwurf robuster Systeme. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1983.
[3] *Schulze, K. P.*: Anwendung des Prinzips der Adaption und des Entwurfs nach der Empfindlichkeit in Mehrgrößenregelungen. Dissertation B, TH Magdeburg 1979.
[4] *Jemeljanow, S. W.*: Automatische Regelungssysteme mit veränderlicher Struktur. Berlin: Akademie-Verlag 1971.
[5] *Stein, G.*: Entwurf parameterunempfindlicher Regler auf der Basis eines modifizierten Gleitzustandes in Systemen mit veränderlicher Struktur. msr, Berlin 25 (1982) 10, S. 551–555.
[6] *Göldner, K.*: Beitrag zur robusten Nachlaufregelung. Wissenschaftliche Zeitschrift der TH Karl-Marx-Stadt 27 (1985) 5, S. 748–752.
[7] *Falk, Ch.*: Ein Beitrag zur Nutzung Systeminverser bei besonderer Berücksichtigung der Nichtminimalphasigkeit diskontinuierlicher Systeme. Dissertation A, TH Karl-Marx-Stadt 1984.
[8] *Göldner, K.; Kubik, St.*: Nichtlineare Systeme der Regelungstechnik. 2. Aufl. Berlin: VEB Verlag Technik 1983.

msr 8562 Prof. Dr. sc. techn. *Klaus Göldner*, TU Karl-Marx-Stadt, Sektion Automatisierungstechnik

Einsatz eines Industrieroboters als flexibler Leiterplattenbohrautomat mit bildschirmorientierter Teach-in-Programmierung

0. Einleitung

Die moderne Industrierobotik hat nach Erscheinen der ersten marktreifen Lösungen zu Beginn der 60er Jahre, gefördert durch die Fortschritte der Mikroelektronik, eine zu Beginn kaum erwartete rapide Entwicklung genommen. Wenn auch fast täglich neue Einsatzgebiete für Industrieroboter bekannt werden, so liegt bis heute der Anwendungsschwerpunkt im Bereich der mechanischen Fertigung, sei es als automatisierte Handhabungseinrichtung für größere Lasten oder als Arbeitsroboter.

Auch in der Elektroniktechnologie bestehen zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten für Industrieroboter. Dabei erfordern die speziellen Einsatzbedingungen, vor allem bezüglich der Größe und Strukturiertheit des Arbeitsraumes, der Positioniergenauigkeit und der zu handhabenden Massen, angepaßte Lösungen. Neben Speziallösungen für die Massenfertigung sind besonders flexible Lösungen für die Fertigung in Klein- und Kleinstserien gefragt. Im folgenden wird ein solcher flexibel einsetzbarer Industrieroboter kurz vorgestellt und eine auch für kleinste Stückzahlen hocheffektive Lösung des Bohrproblems von Leiterplatten als Einsatzfall angegeben.

1. Kurzbeschreibung der benutzten Konfiguration des Industrieroboters IRB 95

Der kinematische Teil des verwendeten Industrieroboters wurde aus Komponenten zusammengestellt, die dem IRB 95-Baukastensystem entstammen [1]. Entwicklungsbetrieb ist das Ingenieurbüro im Institut für Nachrichtentechnik im VEB Kombinat Nachrichtenelektronik. Seine Hauptmerkmale sind:

— Konstruktionstyp	SSS, DSS
— Anzahl der (translatorischen) Achsen	3
— maximaler Verfahrweg	je 400 mm
— Verfahrgeschwindigkeit	0,33 ms^{-1}
— Achsantriebe	GS-Mikromotoren
— Wegemeßsystem	inkremental, 120 Impulse/Umdrehung
— Handhabemasse	$\leqq$ 1 kg.

Das Steuerungsteil wurde abweichend zur ursprünglichen Rechnerausstattung als Einrechnerlösung mit Baugruppen vorwiegend aus der Fertigung des VEB Kombinat robotron aufgebaut. Diese Lösung umfaßt

- den Rechnerregler, mit den Hauptkomponenten
  - Einkartenrechner
  - 25 Kbyte PROM
  - 4 Kbyte RAM (batteriegepuffert)
  - Interface-Karten für die Peripherie und Achsansteuerung
  - Stromversorgung
- die Peripheriekomponenten
  - Tastatur
  - Monitor
  - Floppy-Disk-Externspeicher
  - Lochbandperipherie.

Für den speziellen Anwendungsfall wurde der Roboter mit einem luftgekühlten Hochgeschwindigkeitsbohrkopf (Kavitätenbohrer, 18000 U/min) in einer entsprechenden Halterung ausgerüstet. Die Software wurde um die Komponenten Teach-in-Bohrplan, Lochbandeingabe- und -ausgabe und Leiterplattenbohrroutine erweitert.

2. Bohrproblem

Zahlreiche Aufgaben in der Elektroniktechnologie sind mit Positionierproblemen verbunden. Hierbei handelt es sich darum, daß in einer bestimmten Folge i. allg. diskretwertige Positionen $p_i = (x_i, y_i)$ mit großer Genauigkeit angefahren werden müssen, in denen häufig gleichbleibende Aktionen a_i auszuführen sind. Eine typische Aufgabe dieser Art ist das Einbringen von Bohrungen in Leiterplatten geeigneten Formats. Das Feld der möglichen Bohrpositionen ist hierbei in einem bestimmten Raster von beispielsweise 2,5 mm unterteilt.

Obwohl für diese Aufgabe in der Großserienfertigung Hochleistungsbohrautomaten mit z. T. mehreren Spindeln in Gebrauch sind, besteht ein Bedarf an effektiven Lösungen für das Bohren von Leiterplatten kleiner und kleinster Lose. Bei derartigen flexiblen Bohrautomaten spielt der Aufwand für die Umrüstung, speziell für die Eingabe des Bohrprogramms, eine zunehmende Rolle. Dafür können Teach-in-Verfahren eingesetzt werden [2]. Die mit dem IRB 95 ursprünglich mögliche Programmeingabe nach dem Prinzip des indirekten Teach-in unter Verwendung der sog. Teach-box ist sehr zeitraubend, da die Teilschritte, auch sich wiederholende, mit Hilfe der Funktionstasten bezüglich der Positionskoordinaten, Verfahrgeschwindigkeiten, Fortschaltbedingungen usw. einzeln programmiert werden müssen. Da die Eingabe einer Bohrung hierbei jeweils 54 byte erfordert, besteht außerdem ein relativ großer Speicherbedarf. Unter Verwendung des vorhandenen Arbeitsspeichers können auf diese Weise nur Bohrprogramme für Leiterplatten kleiner Formate programmiert werden. Für eine durchgreifende Verbesserung dieser Situation mußten daher neue Wege beschritten werden. Dazu wurde zunächst in sorgfältig durchgeführten Meßreihen geklärt, daß die Positionier- und Wiederholgenauigkeit des vorliegenden IRB 95 für das Bohren von Leiterplatten hinreichend ist. Außerdem mußten Vorrichtungen zur genauen Positionierung und Fixierung von Leiterplatten für die Standardformate:

- 95×170 mm^2
- 135×170 mm^2
- 170×215 mm^2

entwickelt und montiert werden [3].
Die verbesserte Teach-in-Programmierung sollte folgenden Forderungen genügen:

- Bedienerfreundlichkeit
- leichte Fehlererkennung und Korrektur
- geringer Zeitbedarf
- Speichereffektivität
- Programmerstellung auf Assemblerniveau.

3. Problemlösung

3.1. Teach-in-Programmierung von Bohrplänen

In einem Variantenvergleich wurden folgende Lösungsmöglichkeiten untersucht:

- Variante 1
  Jede Bohrposition $p_i = (x_i, y_i)$ wird durch Eingabe ihrer Koordinaten in Dezimalform programmiert.
- Variante 2
  Die Bohrmuster werden zeilenweise als m-stelliges Binärwort eingegeben.
- Variante 3
  Das Muster der potentiellen Bohrpositionen wird auf einem Bildschirm grafisch dargestellt und über wenige Tastatureingaben spezifiziert.

Wie der Vergleich eindeutig zeigt, weist die als Variante 3 aufgeführte bildschirmorientierte Teach-in-Methode überragende Vorteile auf, so daß diese ausgearbeitet wurde.
Die weitverbreiteten halbgrafischen Displays verfügen über $24 \times 80 = 1920$ Bildpositionen. Damit können beispielsweise für ein zugrunde gelegtes Rastermaß von 2,5 mm alle 72 möglichen Bohrpositionen einer 170 mm langen bzw. breiten Leiterplatte auf einer Zeile dargestellt werden. Die 24 Zeilen des Bildschirms sind für die Darstellung der Bohrpositionen der Leiterplatten der vorgesehenen Formate nicht ausreichend. Dieser Mangel läßt sich jedoch mit einer Routine zum wahlweise manuell oder automatisch gesteuerten Bildschirmrollen leicht überwinden. Der Zeilenbedarf ist im Bild 1 für die 3 betrachteten Leiterplattenformate dargestellt.
Bei Wahl des Teach-in-Modus werden 72×20 mögliche Bohrpositionen als Punktgitter dargestellt. Die Anwahl einer Bohrposition erfolgt durch Kursorsteuerung und deren Eingabe in simpelster Weise durch Tastenbetätigung.
Die Abspeicherung eines Bohrplanes erfolgt ebenfalls sehr rationell. In Zeilenrichtung werden jeweils 8 benachbarte Bohrpositionen in einem Byte als Bitmuster abgespeichert (Bild 2). Das Bohrprogramm für das größte Leiterplattenformat hat somit einen Speicherbedarf von $5000 : 8 = 625$ byte.

3.2. Menügestaltung

Die beschriebene Lösung zur grafischen Teach-in-Programmierung ist in ein dialogorientiert gestaltetes Programmpaket zum bildschirmorientierten Bohren von Leiterplatten eingebunden. In einem Menü werden die folgenden Optionen angeboten:

1. Teach-in-Programmierung von Bohrplänen
2. Programmeingabe über Lochband

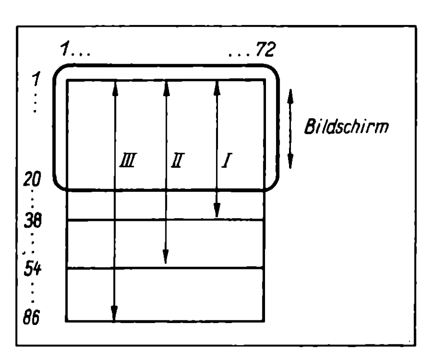


Bild 1. Schema der Bildschirmdarstellung von Bohrmustern unter Verwendung der Rollfunktion
I Format 95×170 mm^2;
II Format 135×170 mm^2;
III Format 215×170 mm^2

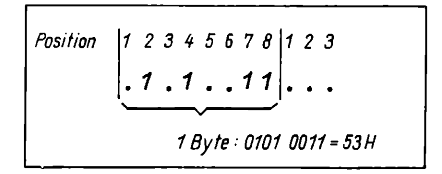


Bild 2. Prinzip der Abspeicherung von Bohrpositionen

3. Programmausgabe auf Lochband
4. Initialisierung
5. Bohrprogramm.

Die Betriebsart 1 ermöglicht die dialogorientierte Eingabe von Bohrplänen mittels Bildschirm und Tastatur (s. Abschn. 3.1.). Alternativ dazu kann in der Option 2 ein extern erstelltes und auf Lochband gespeichertes Bohrprogramm eingelesen und im Arbeitsspeicher abgelegt werden. Umgekehrt dazu kann in der Betriebsart 3 ein beispielsweise im Teach-in-Modus erarbeitetes bzw. im Arbeitsspeicher stehendes Bohrprogramm auf das Speichermedium Lochband übertragen werden.
Die Betriebsart 4 dient der Vorbereitung des Bohrprozesses und umfaßt die Schritte Parametrierung und Synchronisation. Bei der Parametrierung können verschiedene Leiterplattenformate sowie das Rastermaß vereinbart werden (s. Abschn. 2.). Im Rahmen des zweiten Schritts werden der Bohrkopf hinsichtlich eines Bezugspunktes der auf dem Arbeitstisch fixierten Leiterplatte synchronisiert und die Verfahrgeschwindigkeiten gewählt.
Der Modus 5 kann nur nach Eingabe des Bohrplanes (Option 1 oder 2) und erfolgter Initialisierung (Option 4) angewählt werden. Dazu werden alle gesetzten Bohrpositionen entsprechend dem vorgegebenen Rastermaß in Absolutwerte der x- und y-Koordinaten umgerechnet. Das Anfahren der Bohrpositionen sowie das Senken und Heben der Bohrspindel (Z-Achse) erfolgt mit den bei der Initialisierung gewählten Geschwindigkeiten.

Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die Durchführung automatisierter Handhabungen und Arbeitsprozesse in der Elektroniktechnologie verlangt spezielle Ausführungen von Industrierobotern. Als Lösungen dafür können geeignete Konfigurationen aus dem Industrieroboter-Baukasten IRB 95 dienen. Ein Einsatzbeispiel solcher Roboter bildet die Verwendung als flexibler Bohrautomat für Leiterplatten. Im Zusammenhang damit wurde ein dialogfähiges Programmsystem entwickelt, das über eine Menüauswahl alle notwendigen Betriebsarten ermöglicht. Im besonderen wurde durch bildschirmorientierte Teach-in-Programmierung eine hohe Effektivität in der Vorbereitungsphase erreicht, die sowohl kürzeste Programmierzeiten als auch eine hohe Speichereffektivität gewährleistet.
Aus den dargelegten Grundlösungen lassen sich leicht weitere Anwendungsfälle, beispielsweise die automatisierte Prüfung oder auch die Bestückung von Leiterplatten, ableiten.
Die Autoren möchten an dieser Stelle Herrn Dipl.-Ing. *W. Naidenow* für seine wesentliche Mitarbeit danken.

Literatur

[1] *Gehrmann, W.*: IRB 95 — ein Industrieroboter-Baukasten für die Rationalisierung stationärer Montageprozesse. Fernmeldetechnik 23 (1983) 2, S. 74 bis 77.
[2] *Blume, C.; Jacob, W.*: Was leisten Programmiersprachen für Industrieroboter? Elektronik 30 (1982) 6, S. 65.
[3] *Naidenow, W.*: Lernfähiger Leiterplatten-Bohrautomat auf der Basis des Industrieroboters IRB 95. Diplomarbeit, Humboldt-Universität zu Berlin, Sektion Elektronik 1986.

msr 8556 Dipl.-Ing. *Olaf Kulpe*; Prof. Dr. sc. techn. *Wolfgang Weller*, Humboldt-Universität zu Berlin, Sektion Elektronik

5. Wissenschaftliche Konferenz „Anlagenautomatisierung"

Vom 20. bis 22. Mai 1986 führte die TH Leipzig ihre 5. Wissenschaftliche Konferenz „Anlagenautomatisierung" durch. An dieser Konferenz, die von der Sektion Automatisierungsanlagen getragen wurde, nahmen etwa 500 Fachkollegen aus 123 Betrieben und Institutionen der DDR sowie aus dem sozialistischen und nichtsozialistischen Ausland teil. Auf der Konferenz wurden in drei Sektionen folgende aktuelle, praxisrelevante Themenkomplexe behandelt:

Sektion 1: Funktionseinheiten der Anlagenautomatisierung

mit den Schwerpunkten:

- Sensortechnik
- Intelligente Automatisierungsmittel einschließlich Meß- und Stelltechnik
- Signalanalyse

Sektion 2: Projektierung der Anlagenautomatisierung

mit den Schwerpunkten:

- CAD für Aufgabenaufbereitung und -prüfung, für Geräteauswahl und Ausführungsprojektierung
- Softwareprojektierung
- Projektierung der Bedienung, Mensch-Maschine-Kommunikation

Sektion 3: Prozeßsteuerung und -koordinierung in technologischen Prozessen

mit den Schwerpunkten:

- Identifikation und Steuerung dynamischer Prozesse
- Prozeßsicherung und -optimierung, operative Lenkung
- Softwaretechnologie
- Rechnergestützter Entwurf und Realisierung von automatischen Steuerungen (CAD/CAM).



Die Konferenz wurde mit einer Plenarveranstaltung (Bild 2), auf der drei Übersichtsvorträge gehalten wurden, eingeleitet. Begonnen wurde auch diesmal wieder, wie bei den vorangegangenen Konferenzen, mit einem technikorientierten philosophischen Beitrag. In diesem, von *H. Wendt*/TH Magdeburg gehaltenen Vortrag (Bild 1) wurde in eindrucksvoller Weise die große Bedeutung der Anlagenautomatisierung für den sich gegenwärtig vollziehenden technischen Fortschritt aufgezeigt.

Im zweiten Beitrag von *H. Kästner, K.-D. Noll*/VEB Geräte- und Reglerwerk Leipzig, *G. Kunze*/VEB Chemieanlagenbaukombinat Leipzig-Grimma und *W. Bennewitz*/TH Leipzig wurde auf die Bedeutung und die Realisierung der rechnergestützten Arbeit (CAD) für komplette Anlagen eingegangen und gezeigt, daß die Durchgängigkeit der CAD-Lösungen von der Projektierung der technologischen Anlage über die Aufgabenstellung für die Automatisierung bis hin zur Ausführungsprojektierung der Automatisierungsanlage besondere Vorteile ergibt.

Im dritten Plenarvortrag wurde von *D. Balzer*/TH Leipzig und *E. L. Iskovich*/IPU Moskau die Wechselwirkung zwischen Mikrorechentechnik und Automatisierungstheorie behandelt. Die These, daß durch die Mikrorechentechnik auch neue Überlegungen zu Steuerungskonzeptionen initiiert werden, wurde u. a. durch ein Beispiel aus der Verfahrenstechnik eindrucksvoll untermauert.

In den sich an die Plenarveranstaltung anschließenden parallelen Sitzungen der drei Sektionen wurden 78 Vorträge und 56 Posterbeiträge dargeboten. Wesentliches zum Inhalt der in den Sektionen gehaltenen Fachvorträge soll im folgenden auszugsweise wiedergegeben werden.

Funktionseinheiten der Anlagenautomatisierung

Dieser Themenkomplex (Sektion 1) stand unter der Leitung von Prof. Dr. sc. techn. *W. Richter*, Prof. Dr. sc. phil. *W. Kriesel* und Prof. Dr. sc. techn. *H.-G. Woschni*. Der Inhalt der 26 dargebotenen Vorträge und der 20 Posterbeiträge war geprägt vom wissenschaftlichen Disput um die möglichen Richtungen zur Weiterentwicklung von Automatisierungssystemen auf Mikroprozessorbasis. Aus dem Inhalt der Vorträge und den lebhaften Diskussionen wurde deutlich, daß diese Weiterentwicklung durch den anhaltenden Innovationsschub der Mikro- und Optoelektronik immer wieder neu angeregt wird und daß sich einzelne Komponenten zukünftiger Systeme bereits deutlich herausbilden. Eine übereinstimmende Auffassung zum Inhalt einer nächsten Generation von Automatisierungsanlagen ist jedoch für die konkrete Ausprägung der hierfür erforderlichen Funktionseinheiten und Strukturen noch nicht vollständig erreicht, so daß die Variantendiskussion fortzuführen ist. Für die mittelfristige Entwicklung erscheinen jedoch zwei Richtungen als relevant:

- Einführung intelligenter Meß-, Stell-, und Leiteinrichtungen sowie deren direkte Kopplung über ein prozeßnahes, bitserielles Feldbussystem
- Verzahnung zwischen der Automatisierungsanlage und der kommerziellen Rechentechnik durch Einsatz lokaler Netze (LAN) und deren Anbindung an Weitbereichsnetze (WAN).

Eröffnet wurde diese Sektion mit einem Übersichtsvortrag von *W. Richter*/TH Leipzig zur Sensorik für die Automatisierungstechnik. Besonders herausgestellt wurden dabei die sich abzeichnenden Entwicklungstendenzen auf dem Gebiet der dünnen Schichten, der Chemo- und Biosensoren.

In dem anschließenden Vortrag von *S. S. Issa*/Kuweit wurde die meßtechnische Analyse von Lastzuständen und ihre interaktive On-line-Auswertung mit Mikrorechnern behandelt. Einen neu entwickelten taktilen Sensor zur Erfassung der Geometrie von Schweißnähten stellten *F. Köckritz*, *M. Schäfer* und *M. Löcher*/VEB Chemieanlagenbaukom-

Bild 1. Prof. H. Wendt/TH Magdeburg bei seinem Plenarvortrag ◄



Bild 2. Das Auditorium während eines Plenarvortrages

In der ersten Reihe von rechts nach links: *Prof. Rossa*/TH Brno (ČSSR), *Prof. Richter*/TH Leipzig, Direktor der Sektion Automatisierungsanlagen, Magnifizenz Prof. *Altner*/Rektor der TH Leipzig, *L. Plecher*/TH Leipzig

binat Leipzig-Grimma vor. *Wo. Richter*/TH Leipzig befaßte sich in seinem Vortrag mit Sensoren und Sensorsystemen zur Messung an mikrophysikalischen verfahrenstechnischen Prozessen. Auf spezielle Einsatzmöglichkeiten von Sensoren auf der Basis von Lichtleitern wiesen *M. Pieczarka* und *W. Machowski*/Polytechnikum Krakow (VR Polen) hin. Hervorzuheben ist auch der Vortrag von *T. Heimburger*/VEB SKET Magdeburg, *J. Krieger, R. Maaß, B. Michaelis* und *Chr. Wartini*/TH Magdeburg, in dem auf die großen Einsatzmöglichkeiten von optoelektronischen Sensoren für meßtechnische Probleme im Schwermaschinenbau eingegangen wurde. *R. Borch* und *G. Gruhn*/TH Leipzig stellten die Mikrorechnerimplementierung einer digitalen Korrektur des nichtlinearen Übertragungsverhaltens von Schutzstromwandlern vor. Von den Vorträgen zur Weiterentwicklung von Automatisierungssystemen auf Mikroprozessorbasis, die auf kurzfristige Anwendungen zur unmittelbaren industriellen Nutzung zielen, sind insbesondere der von *M. Seifart* und *H. Beikirch*/TH Magdeburg „Prozeßnahe Meßdatenerfassung und -verarbeitung mit intelligenten Meßumformern" sowie der von *F. Güttler*/TH Magdeburg „Dezentrales Automatisierungssystem für den prozeßnahen Bereich" hervorzuheben. Als Beiträge, die einen mittelfristigen Vorlaufcharakter der Forschungsarbeiten kennzeichnen, sind zum Systemrahmen *W. Kriesel, P. Gibas* und *K. Steinbock*/TH Leipzig „Neuartige Ansätze für die Technik künftiger Automatisierungsanlagen mit intelligenten Geräten" und zu Übertragungsproblemen *P. Gibas, Ch. Kozub* und *W. Kriesel* zum Thema „Prozeßnahe Informationsübertragung mit Feldbussystemen" zu werten.
Darüber hinaus verdient der Beitrag von *D. Hanselmann*/Universität Paderborn (BRD) „Digitale Ein-Chip-Signalprozessoren in der Meß- und Regelungstechnik" als ausführlicher Überblick zu speziellen Problemen der schnellen Informationsverarbeitung besondere Beachtung, da er auf die qualitativ neuartigen Möglichkeiten durch Applikation von Signalprozessoren aufmerksam macht.

Projektierung der Anlagenautomatisierung

Dieser Themenkomplex (Sektion 2) wurde von Prof. Dr. sc. techn. *R. Müller* und Doz. Dr. sc. techn. *W. Bennewitz* geleitet.
Jede der genannten 4 Themengruppen wurde mit einem Übersichtsvortrag eingeleitet. In den zum Gebiet der rechnergestützten Projektierung speicherprogrammierbarer Binärsteuereinrichtungen gehaltenen Vorträgen wurde der Stand der Algorithmierung und der rechnergestützten Bearbeitung bei Binärsteuerungsprojekten verdeutlicht. Die lebhaften Diskussionen zu den Vorträgen spiegelten das große Interesse an dieser Thematik wider. Die Anwendungsmöglichkeiten, die Vor- und Nachteile der systematisierten Aufgabennotierung als Graph (PAG bzw. PRAP/STAP) oder als Funktionsplan wurden in Vorträgen von *M. Strüver* und *N. Trautwein*/TH Leipzig und *E.-U. Hafa* und *B. Essegern*/EAB Berlin aufgezeigt. Die Vorteile dieser Notierungen für bestimmte Anwendungsbereiche wurden betrachtet.
Die Graphenmethode diente als Basis für die rechnergestützte Projektierung umfangreicher Binärsteuerungen im VEB Leuna-Werke „Walter Ulbricht" (*H.-P. Graul* und *H.-G. Krauße*). Mit eindrucksvollen Beispielen wurde aufgezeigt, daß abhängig von der gewählten Kodierungsart (speicherminimale, 1-aus-n oder Ausgangsvariablenkodierung) der benötigte Speicherplatz etwa im Verhältnis von 1 : 2 schwankt. Dabei bedingt der Inhalt der Aufgabenstellung, in welcher Kodierungsart der geringste Speicherplatz benötigt wird. Die rechnergestützte Projektierung mittels Bürocomputer bringt somit nicht nur den Vorteil der Erleichterung der Arbeit (Wegfall der zeitaufwendigen Programmierung von Hand) und damit gleichzeitig die Fehlerfreiheit bei der Programmierarbeit, sondern auch den Vorteil, mit wenigen Eingaben zu unterschiedlichen und damit vorteilhaften Lösungsvarianten zu gelangen. Beeindruckend ist die ausgewiesene Reduzierung der Inbetriebsetzungszeit infolge rechnergestützt geprüfter Aufgabenstellung und rechnergestützt erzeugter Befehlslisten (Faktor 5 ... 10 für den automatisierungsrelevanten Anteil), Der Beitrag von *Graul/Krauße* erscheint in msr, Berlin 30 (1987) 6, einem Schwerpunktheft zur Thematik „CAD in der Anlagenautomatisierung".
Mit dem bereits genannten Vortrag von *E.-U. Hafa* und *B. Essegern* und einem Vortrag von *G. Liermann* und *L. Hennig*/TH Magdeburg zum Einsatz von Petri-Netzen als Modell für die Überwachung und Diagnostizierung von industriellen Binärsteuerungen erfolgte eine Gegenüberstellung zu anderen Herangehensweisen in der Steuerungsprojektierung bzw. in Beiträgen von *K. Stephan* und *H.-M. Hanisch*/TH Leuna-Merseburg zu noch weiter vorgelagerten Arbeiten zur Aufgabenklärung.
Diskussionswünsche nach einer Empfehlung bezüglich einer vereinheitlichten Methode konnten nicht befriedigt werden, da die vom Produktionsvolumen her größere Aggregatautomatisierung, bei der Automatisierungsobjekt und Steuerung in einer Hand liegen, mit der notwendigerweise arbeitsteilig zu erstellenden Automatisierung methodisch nicht vergleichbar ist.
Zur rechnergestützten Erarbeitung von Ausführungsunterlagen wurde von *W. Bennewitz*/TH Leipzig ein modulares Konzept vorgestellt (s. auch Bericht über das 8. Leipziger Automatisierungskolloquium in msr, Berlin 29 (1986) 5, S. 234). *H. Rudolph* und *Th. Baudrexel* sowie *A. Meißner*/AdW, ZKI Berlin behandelten in ihren Beiträgen Probleme der Grafik im Bildschirmdialog.
In den zur Mensch-Maschine-Kommunikation gehaltenen Vorträgen von *J. Bergmann*/TH Leipzig, *P. Grunert* und *H. Mähnert*/TU Dresden sowie *Th. Hofmann* und *R. Schulze*/TH Leipzig standen Ergebnisse aus Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit und Belastbarkeit des Menschen als Basis für zukünftige CAD-Bausteine zur Aufgabenprüfung im Vordergrund. *R. Müller*/TH Leipzig wies in seinem grundlegenden Beitrag zum Projektierungsprozeß in seiner Wechselwirkung zu den gestiegenen Möglichkeiten moderner Automatisierungsmittel besonders auch auf die zunehmende Bedeutung der Bedienkonzeption infolge der Leistungssteigerung der Automatisierungsmittel hin. Von *St. Drabek* und *U. Engmann*/TH Ilmenau wurde eine einfache Spezifikationssprache für Automatisierungsaufgabenstellungen vorgestellt.
In einer größeren Anzahl von Beiträgen wurden ausgewählte Probleme der Softwareprojektierung einschließlich der Auswertung ausgeführter Anlagen behandelt. *H. Unbehauen*/Ruhr-Universität Bochum (BRD) stellte in seinem Vortrag „KEDDC — Ein Softwaresystem zur rechnergestützten Analyse und Synthese digitaler Regelungen" (erscheint in msr, Berlin 30 (1987) 2, einem Schwerpunktheft zu Fragen der Softwaretechnologie in der Automatisierungstechnik) ein leistungsfähiges, sehr universell einsetzbares Programmsystem zum Entwurf von digitalen Automatisierungssystemen vor.

Prozeßsteuerung und -koordinierung in technologischen Prozessen

Dieser Komplex (Sektion 3) wurde von Prof. Dr. sc. techn. *D. Balzer* und Prof. Dr. sc. techn. *H. Ehrlich* geleitet. Die Entwicklung moderner Methoden und Algorithmen der angewandten Prozeßsteuerung wird vor allem durch drei Faktoren nachhaltig beeinflußt:

- die weit fortgeschrittene Theorie
- die zunehmende Komplexität und Kompliziertheit der Prozesse sowie erhöhte Qualitätsanforderungen an ihre Steuerung
- die durch die Mikrorechentechnik gegebenen und schnell anwachsenden potentiellen Realisierungsmöglichkeiten.

Der generelle Trend ist dadurch gekennzeichnet, daß in Zukunft alle Algorithmen zur Steuerung technologischer Prozesse digital und überwiegend durch programmierbare Rechentechnik realisiert werden. Aus diesem Grunde haben die Aspekte der rationellen Softwareentwicklung und daraus abgeleiteter Fragen auch hier ein besonderes Gewicht. In den Fachvorträgen wurde ein breites Spektrum von Fragen behandelt, das von theoretischen Beiträgen bis zu konkreten Anwendungsfällen, von der Automatisierung auf prozeßnaher Ebene bis zur übergeordneten Prozeßführung reicht. Es wurden dabei Fragen der Identifikation und Parameterschätzung, der Anwendung adaptiver Verfahren und des Entwurfs robuster Regelungssysteme, des optimalen Entwurfs nach verschiedenen Gütekriterien ebenso behandelt wie Probleme unter Einbeziehung der operativen Lenkung und Steuerung und der dazu notwendigen Mensch-Maschine-Kommunikation. Die Sektionssitzung wurde mit einem Vortrag zur Reglerdimensionierung auf der Grundlage vektorieller Gütekriterien, die es gestatten, mehrere Entwurfsforderungen bzw. -ziele zu berücksichtigen, eröffnet. Für den Entwurf stehen in FORTRAN geschriebene Programme für den Zeit- und Bildbereich zur Verfügung. *H. Hejmo*/Polytechnikum Krakow (VR Polen) berichtete über theoretische Untersuchungen zur Empfindlichkeit zeitoptimaler Steuerungen im geschlossenen System. Dabei wurde vor allem die Empfindlichkeit der Steuerung bezüglich Modellvariationen betrachtet. Im Beitrag von *Ch. Döschner* und *H. Knorr*/TH Magdeburg zur Parameterschätzung multivariabler Prozesse wurde der Vorteil der Nutzung von A-priori-Informationen aus der

theoretischen Prozeßanalyse für die Konzipierung der anschließenden Parameteridentifikation dargestellt. Bei Prozessen mit instationären Prozeßphasen treten häufig neben den Prozeßsteuerungsalgorithmen (PSA) viele binäre Steuergrößen auf, die die Struktur und die Parameter des Objektes und der PSA steuern. Dieses aktuelle Problem der Integration verschiedener Steuerungsarten in einem flexiblen Automatisierungssystem wurde von *H. Ehrlich* und *K. Fiedler*/TH Leipzig behandelt. Über ein rechnergestütztes Verfahren zum Entwurf robuster adaptiver Systeme ohne Vergleichsmodell unter Verwendung adaptiver Beobachter berichteten *K.-P. Schulze* und *H.-J. Herrmann*/TH Leipzig. Unter Verwendung von Reglern mit variabler Struktur und Realisierung von gleitzustandsähnlichen Arbeitsregimes ist ein interessanter Entwurfszugang für robuste Regelungen möglich. Im Beitrag von *G. Stein* und *I. Rennert*/TH Leipzig wurde die Parameterunempfindlichkeit derartiger Regelungen, die mittels Ljapunov-Funktion entworfen werden, untersucht. *S. Altmann*/TH Leipzig befaßte sich in seinem Vortrag mit der Anwendung von Schaltnetzwerken und Graphen für die Modellierung sicherheitstechnischer Maßnahmen in technologischen Prozessen. Von *E. L. Izkovich* und *L. R. Sorkin*/IPU Moskau wurde ein Verfahren zur Online-Optimierung kontinuierlicher Prozesse vorgestellt. Aus der Formulierung der Gesamtaufgabe wurden Lösungsabschätzungen und eine Dekompositionsmethode abgeleitet.

Steuerung und Realisierung komplexer Produktionsprozesse erfolgen vor allem auch unter Einbeziehung des Menschen. Im Beitrag von *W. Schwarz*/VEB „Otto Grotewohl" Böhlen wurde insbesondere der informationelle Aspekt und die Organisation derartiger ergatischer Steuerungssysteme behandelt. Produktionssysteme sind letzten Endes nach ökonomischen Zielstellungen zu steuern, wobei gleichzeitig mehrere Kriterien möglichst gut zu erfassen sind. Im Vortrag von *G. Brack* und *U. Haeseler*/TH Leuna-Merseburg wurde die Problemlösung durch operative Steuerung auf der Grundlage des durch Polyoptimierung ermittelten, situationsbezogenen Optimums behandelt.

Elemente der künstlichen Intelligenz und Wissensverarbeitung werden zunehmend in automatisierten Steuerungssystemen mit Rechnerunterstützung eingesetzt. Von *B. Böhme* und *R. Wieland*/TH Leipzig wurden dazu allgemeine Ausführungen gemacht sowie Möglichkeiten der Anwendung auf ein Prozeßsicherungssystem unter Verwendung von PROLOG erörtert. Von *D. Böhme* und *J. Wernstedt*/TH Ilmenau wurden die mit Beratungs- und Expertensystemen zur operativen Steuerung technischer und nichttechnischer Prozesse gewonnenen Erfahrungen diskutiert und Schlußfolgerungen für das allgemeine Herangehen bei der Entwicklung derartiger Systeme gezogen. *D. Balzer*/TH Leipzig und *G. Reinig*/TU Dresden behandelten in ihrem Beitrag die allgemeinen sowie die für die Prozeßautomatisierung spezifischen Probleme der Softwaretechnologie. Ein CAD-Entwurfskonzept für Mehrgrößen-Tuning-Regler mit PI-Regelungsgesetz wurde von *U. Jumar* und *U. Korn*/TH Magdeburg vorgestellt. Über eine spezielle Anwendung von Selftuning-Algorithmen bei der Automatisierung von Alkoholdestillationskolonnen wurde von *R. Dittmar* und *P. Bierl*/VEB Chemieanlagenbaukombinat Leipzig-Grimma berichtet. *M. Günther* und *J. Krause*/TH Ilmenau behandelten in ihrem Vortrag den rechnergestützten Entwurf von Abtast-Regelungssystemen unter Berücksichtigung praxisrelevanter und für das Funktionieren der Regelung wichtiger Randbedingungen. Der Vortrag von *J. Ober*/TH Gliwice (VR Polen) war der vorteilhaften Anwendung von C-Compilern bzw. der Programmiersprache C zur Lösung von Identifikationsaufgaben dynamischer Prozesse gewidmet. *K. Obermayer*/BASF AG Ludwigshafen (BRD) befaßte sich in seinem Beitrag mit den Anforderungen an die rationelle Softwareerstellung und ihrer flexiblen Konfigurierung auf der Grundlage vorkonfektionierter Softwarebausteine und -strukturen für die Steuerung von Chargenprozessen. Von *R. Große*, *K. Damert* und *H.-J. Hörig*/VEB Chemische Werke Buna wurde die Anwendung von Prozeßsicherungssystemen auf Reaktionsprozesse vorgestellt. *V. Kirbach* und *B. Koch*/TH Leipzig berichteten über die Anwendung eines MR-Prozeßsicherungssystems für eine Drucklufterzeugungs- und Versorgungsanlage eines chemischen Großbetriebes. Aus den gewonnenen Erfahrungen wurden allgemeine Hinweise für den Entwurf von Prozeßsicherungssystemen abgeleitet.

Der Inhalt der Vorträge und die Fachgespräche am Rande der Konferenz boten den Teilnehmern aus der Praxis und aus den Hochschul- und Forschungseinrichtungen vielfältige Möglichkeiten des Erfahrungsaustausches und regten zugleich zum eigenen Nachdenken über die neuen und gewachsenen Möglichkeiten des effektiven Einsatzes der modernen Mittel der Prozeßautomatisierung an. Die Vorträge wurden in den „Wissenschaftlichen Berichten der TH Leipzig", Heft 2 bis 4/1986 sowie in einem Sonderheft publiziert und als Tagungsmaterial zur Verfügung gestellt.

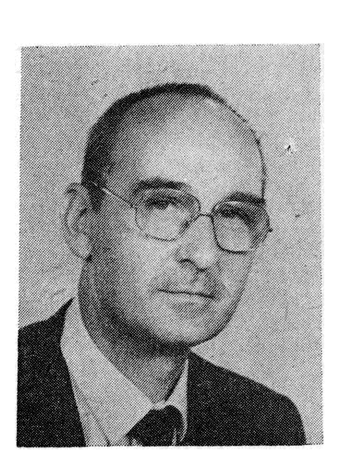
Das seit vielen Jahren unvermindert anhaltende große Interesse an dieser internationalen Konferenz und die von den in- und ausländischen Teilnehmern gewürdigte Wahl der behandelten Themenkomplexe sowie die Qualität der Vorträge und Diskussionen bestätigen den guten Ruf der Leipziger Konferenz „Anlagenautomatisierung", die, wie bisher, im dreijährigen Rhythmus weitergeführt werden soll.

msr 8584 *K.-P. Schulze*



PERSÖNLICHES

Professor Dr. sc. nat. Volker Kempe zum Akademiemitglied gewählt



Professor Dr. sc. nat. *Volker Kempe* hat sich als Wissenschaftler und als Direktor des Zentralinstituts für Kybernetik und Informationsprozesse (ZKI) der AdW der DDR bleibende Verdienste und die Anerkennung der Fachwelt erworben. In Würdigung seiner Leistungen wurde er im Juli 1986 zum ordentlichen Akademiemitglied gewählt.

Nach seinem Studium 1957 bis 1963 am Energetischen Institut in Moskau nahm er eine Tätigkeit auf dem Gebiet der Schwingungsforschung im damaligen Heinrich-Hertz-Institut der AdW der DDR auf. Die Promotion A (Doppelt gepumpte parametrische Netzwerke) schloß er 1968 als Dr.-Ing. ab. Die Promotion B (Dr. sc. nat.) im Jahre 1976 war der Thematik „Theorie stochastischer Prozesse" gewidmet. In dieser Zeit führte er auch Arbeiten zu den Gebieten Schätztheorie, Informationstheorie und Nachrichtentechnik durch, zu denen er reiche Spezialkenntnisse sammeln konnte.

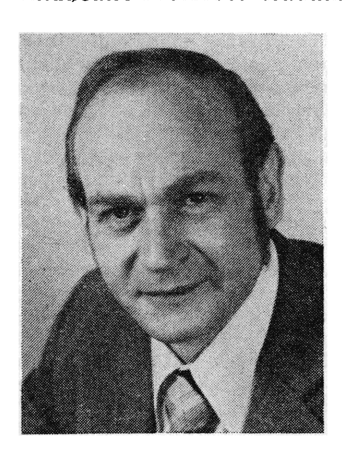
Aufgrund seiner Leistungen wurde ihm 1977 die Leitung des ZKI übertragen, und 1978 wurde er zum Akademieprofessor ernannt. Es war immer das Anliegen von Prof. *Kempe*, die volkswirtschaftliche Wirksamkeit des ihm anvertrauten Forschungspotentials zu erhöhen. Diese Anstrengungen wurden mit hohen staatlichen Auszeichnungen geehrt, z. B. „Banner der Arbeit" 1970 und „Nationalpreis 1. Klasse" 1976 und 1982.

Hervorzuheben ist, daß sich Prof. *Kempe* neben der Wahrnehmung umfangreicher wissenschaftsorganisatorischer Arbeiten intensiv an der Lösung wissenschaftlicher Probleme ausgewählter Schwerpunktforschungsvorhaben des ZKI beteiligt, z. B. zur Robotersteuerung, zur digitalen Bildverarbeitung und zur Informatik. Schwerpunkte seiner umfangreichen wissenschaftlichen Arbeit waren stets: Theorie und Anwendung stochastischer Systeme, Systemtheorie und digitale Signalverar-

beitung. Die dabei erzielten Ergebnisse schlugen sich in zahlreichen Publikationen nieder, darunter mehr als 100 Fachartikel und 3 Monographien.
Zudem hat sich Prof. *Kempe* bei der Gestaltung innerstaatlicher und internationaler Kooperationsbeziehungen im Rahmen der von der Grundlagenforschung der DDR (insbesondere im Zusammenhang mit den Regierungsabkommen Industrieroboter und Fernerkundung der Erde) zu erbringenden Leistungen Verdienste erworben. Das führte u. a. zur Wahl als Korrespondierendes Mitglied der Internationalen Astronautischen Akademie.
1984 wurde Prof. *Kempe* zum Korrespondierenden Mitglied der Akademie der Wissenschaften gewählt. Er ist Mitglied des Vorstandes der Gesellschaft für Informatik der DDR. Seine wissenschaftlichen und wissenschaftsorganisatorischen Leistungen und sein konsequentes Drängen auf einen breiten, volkswirtschaftlich effektiven Einsatz der Rechentechnik führten nun zur Wahl zum ordentlichen Akademiemitglied.
Die Mitarbeiter des ZKI, seine Fachkollegen und die Mitarbeiter der Redaktion msr gratulieren Herrn Prof. *Kempe* recht herzlich.

Hans Fuchs

Dr. sc. nat. Norbert Ahlbehrendt zum Akademie-Professor ernannt



In einem Festakt ernannte der Präsident der Akademie der Wissenschaften (AdW) der DDR am 4. September 1986 35 neue Akademie-Professoren, unter ihnen Dr. sc. nat. *Norbert Ahlbehrendt* aus dem Zentralinstitut für Kybernetik und Informationsprozesse (ZKI) der AdW der DDR.

N. Ahlbehrendt studierte an der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock. 1966 diplomierte er dort auf dem Gebiet der theoretischen Physik.
Nach seiner Promotion A an der Wilhelm-Pieck-Universität Rostock nahm er eine Tätigkeit an der AdW auf. Seit 1978 ist er Mitarbeiter des ZKI, zunächst als Gruppenleiter und jetzt als Leiter der Abteilung „Steuerungssysteme". 1983 verteidigte Dr. *Ahlbehrendt* seine Dissertation B zum Thema „Analyse stochastischer Systeme" erfolgreich.
N. Ahlbehrendt ist ein profilierter und anerkannter Wissenschaftler auf den Gebieten: Schätztheorie, Analyse und Synthese stochastischer Systeme und Robotertechnik. Beleg dafür sind zahlreiche Veröffentlichungen und Vorträge im nationalen und internationalen Rahmen. Ein wesentlicher Beitrag zur Entwicklung des Fachgebietes ist das 1984 erschienene und gemeinsam mit Prof. *V. Kempe* erarbeitete Buch „Analyse stochastischer Systeme", in dem ein breites Spektrum von analytischen Methoden im Hinblick auf ihre flexible Anwendbarkeit und Anpaßbarkeit systematisiert und weiterentwickelt wurde.
Wesentliche Ergebnisse seiner letzten Arbeiten waren Beiträge zur „Synthese nichtlinearer Schätzalgorithmen". Hierbei ist der Begriff der bereichsstabilen Schätzung entwickelt worden, bei der mit Hilfe einer heuristisch gewählten Ljapunow-Funktion das Synthese- und das Analyseproblem vereint werden.
Ebenso brachten seine Arbeiten zu „Adaptiven Reglern" entscheidende Fortschritte bei der Achsregelung von Industrierobotern. Auf dem Gebiet „Mehrvariable Systeme" konnte Dr. *Ahlbehrendt* mit seiner Arbeitsgruppe ab 1982 sowohl konzeptionelle als auch algorithmische Ergebnisse vorlegen, die fortgeschrittene Robotersteuerungen insbesondere bezüglich der Trajektoriengenerierung und Echtzeitsensorrückkopplung beinhalten. Dabei werden die Prozeßmodelle mit einbezogen. Einige seiner Arbeiten wurden bereits unter industriellen Einsatzbedingungen erfolgreich getestet.
In Anerkennung seiner Leistungen auf den o. g. Spezialgebieten der technischen Kybernetik ernannte der AdW-Präsident, Prof. *Werner Scheler*, Dr. *Ahlbehrendt* zum Professor an der AdW der DDR.
Seine Fachkollegen und die Mitarbeiter der Redaktion msr gratulieren Prof. *Ahlbehrendt* auf diesem Wege recht herzlich.

Hans Fuchs

Ehrenpromotion für Professor Dr.-Ing. habil. Harry Trumpold



Am 26. Juni 1986 wurde dem früheren Vorsitzenden der WGMA, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Harry Trumpold*, für seine außerordentlichen Leistungen als Hochschullehrer und Wissenschaftler die akademische Würde Dr.-Ing. E. h. von der TU Dresden verliehen.
Professor *Trumpold* ist weit über die Grenzen unseres Landes hinaus durch hervorragende wissenschaftliche Ergebnisse auf den Gebieten Fertigungsmeßtechnik, Austauschbau und Qualitätssicherung bekannt.
Im Jahr 1948 nahm er an der noch schwer zerstörten Technischen Hochschule Dresden ein Studium an der Fakultät Maschinenwesen auf und beendete es 1952 in der Fachrichtung Meßtechnik als Schüler des Nestors dieses Gebietes, Prof. *Georg Berndt*. Bei ihm erhielt er als Assistent und Oberassistent auch seine anschließende wissenschaftliche Ausbildung in Lehre und Forschung, die künftig sein gesamtes Leben und Wirken prägen sollte. Dazu legte er 1957 mit seiner Dissertationsschrift zum Thema „Schaffung von Oberflächen-Normalen für die Oberflächen-Normung" die wesentliche Grundlage. Mit seiner Habilitationsschrift „Kritische Untersuchungen über die Messung, Herstellung und Anwendung von Winkelendmaßen" im Jahre 1964 weitete er sein wissenschaftliches Arbeitsgebiet auf die Probleme der Lageabweichungen aus.
Diese Arbeiten machten Prof. *Trumpold* sehr schnell im In- und Ausland bekannt. Der Berufung zum Direktor des Instituts für Meßtechnik an die Hochschule für Maschinenbau Karl-Marx-Stadt im Jahre 1957 folgte 1964 die Berufung zum Professor an die inzwischen in den Rang einer Technischen Hochschule erhobenen Bildungsstätte. Sie bot ihm die Möglichkeit, am Aufbau einer inzwischen national und international hoch geschätzten Lehr- und Forschungsstätte mitzuwirken. Er stellte dabei nicht nur wissenschaftliche Kreativität, sondern auch viel Energie und wissenschaftsorganisatorische Fähigkeiten bei engster Bindung an die industrielle Praxis unter Beweis. Ihm wurden deshalb von 1960 bis 1963 die Aufgaben als Prodekan und Dekan der Fakultät für Maschinenwesen, von 1963 bis 1968 die Funktion des Prorektors für den wissenschaftlichen Nachwuchs und von 1971 bis 1975 erneut das Amt eines Dekans an der TH Karl-Marx-Stadt übertragen. Folgerichtig führten die Ergebnisse seiner Tätigkeit und seine Anerkennung als Fachmann 1974 auch zur Berufung als Leiter der Hauptforschungsrichtung „Qualitätssicherung, Zuverlässigkeit und Standardisierung" durch den Minister für Hoch- und Fachschulwesen. Er koordinierte in dieser Eigenschaft mit viel Umsicht und erfolgreich die Grundlagenforschung des Hochschulwesens auf den angegebenen Gebieten. Professor *Trumpold* hat sowohl mit dieser koordinierenden Tätigkeit als Wissenschaftsorganisator als

auch durch die maßgebenden wissenschaftlichen Leistungen des Wissenschaftsbereiches Fertigungsmeßtechnik der TH Karl-Marx-Stadt entscheidend zu der progressiven Zusammenarbeit und zur Arbeitsteilung zwischen den Meßtechniklehrstühlen der DDR beigetragen. Die Zusammenarbeit mit seiner einstigen alma mater ist dabei besonders ausgeprägt. Regelmäßiger Studentenaustausch seit mehreren Jahren, gemeinsame große wissenschaftliche Veranstaltungen und Veröffentlichungen, gegenseitige Nutzung und abgestimmte Investition großer Meßgeräte bis zur engen fachlichen und persönlichen Zusammenarbeit der wissenschaftlichen Mitarbeiter sind einige Ergebnisse dieses fruchtbaren Verhältnisses.

Das wissenschaftliche Wirken von Prof. *Trumpold* als Hochschullehrer und Forscher konzentriert sich in ausgewogener Einheit von Lehre und Forschung auf die Gebiete Austauschbau und Fertigungsmeßtechnik sowie zunehmend auf die Grundfragen der Qualitätssicherung. Mit viel Umsicht und feinem Gespür für die kommenden Aufgaben der Industrie hat Prof. *Trumpold* die Ausbildung für die heutige Fachrichtung Qualitätssicherung und Fertigungsmeßtechnik an der TH Karl-Marx-Stadt aufgebaut. Darüber hinaus hat er gemeinsam mit dem Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung ein postgraduales Studium zur Ausbildung von Fachingenieuren für Qualitätssicherung aufgebaut und mit den bisher mehr als 700 Absolventen wesentlich dazu beigetragen, den Mangel an qualifizierten Fachkadern für die Qualitätssicherung in der Industrie zu mindern.

Mit der wissenschaftlichen Arbeit des von ihm geleiteten Kollektivs hat Prof. *Trumpold* auf dem Gebiet der Gestaltmeßtechnik eine national wie international anerkannte wissenschaftliche Schule entwickelt. Sie gründet sich auf zahlreiche persönliche wissenschaftliche Arbeiten (inzwischen über 150 Veröffentlichungen), mehr als 50 Dissertationsschriften seiner Mitarbeiter und weiterer Doktoranden, über 400 Diplomarbeiten sowie zahlreiche Gastvorlesungen an Universitäten in 11 Ländern.

Besondere Erwähnung verdienen die vielen Vorträge und Diskussionsbeiträge von Prof. *Trumpold* im In- und Ausland sowie die Organisation von zahlreichen nationalen und internationalen Konferenzen. Hervorzuheben sind die regelmäßigen „Internationalen Oberflächenkolloquien" in Karl-Marx-Stadt, die mit ihren zahlreichen und beständigen Teilnehmern aus den Ländern des SW und des NSW inzwischen als eine Stätte des internationalen Erfahrungsaustausches ausgewiesen sind. Weit über die Grenzen unseres Landes ist auch das aktive und konstruktive Auftreten von Prof. *Trumpold* als DDR-Repräsentant in internationalen Organisationen, wie IMEKO, CIRP, ECE, EOQC, bekannt. Die außergewöhnliche Ausstrahlung von Prof. *Trumpold* stützt sich nicht zuletzt auch auf sein aktives gesellschaftliches Engagement in der LDPD, für die er seit vielen Jahren als Mitglied der Volkskammer tätig ist. Darüber hinaus ist er seit 1969 Vorsitzender des Bezirksausschusses Karl-Marx-Stadt der Nationalen Front, seit 1958 Vorsitzender des Arbeitsausschusses „TKO" der KDT im Bezirk Karl-Marx-Stadt. Er war langjähriger Vorsitzender der Wissenschaftlich-Technischen Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik in der Kammer der Technik. Als Vizepräsident der Freundschaftsgesellschaft DDR — Großbritannien in der Liga für Völkerfreundschaft der DDR trägt er an verantwortlicher Stelle dazu bei, die großen Anstrengungen unseres Landes um einen hohen Beitrag zur Wahrung des Friedens in der Welt und zur friedlichen Koexistenz der Völker zu verwirklichen. Will man ein Bild von dem Wissenschaftler, Hochschullehrer und engagierten Politiker Prof. *H. Trumpold* zeichnen, dann gelingt dies nur, wenn man auch seine menschliche Wärme, seine Unkompliziertheit und seine Aufmerksamkeit für alle großen und kleinen Probleme seiner Mitarbeiter, Studenten und Mitmenschen einbezieht. Trotz seiner hohen und vielfältigen Belastung findet er immer wieder Zeit zu einem persönlichen Gespräch. Daß sein Kollektiv auf einen solchen Chef stolz sein kann und stolz ist, bedarf keiner besonderen Begründung.

Seine Freunde, Schüler und Fachkollegen in der DDR sowie die Mitarbeiter der Redaktion msr gratulieren Herrn Prof. *Trumpold* herzlich zu der hohen Ehrung.

Werner Lotze

msr DISSERTATIONEN

Untersuchung von Mehrgrößensystemen auf der Basis der Eingangs-Ausgangs-Beziehungen — strukturelle und quantitative Kopplungsanalyse, Dekomposition und optimale Entkopplung



Ziel der Arbeit ist eine umfassende Analyse der Kopplungen in Mehrgrößensystemen als Grundlage für zweckmäßige Strukturentscheidungen beim Entwurf der Regelung. Den praktischen Bedingungen entsprechend werden 4 wesentliche Stufen steigender Information über den Prozeß unterschieden (strukturelle, statische, dynamische Systemanalyse und Störsignalanalyse) und gezeigt, mit welcher Information welche Entscheidungen fundiert gefällt werden können.

Bei der strukturellen Kopplungsanalyse werden bei Bezug auf die Eingangs-Ausgangs-Beziehungen einfache Bedingungen für die Dekomposition in Eingrößen- bzw. Mehrgrößensubsysteme, deren charakteristische Gleichungen unabhängig voneinander sind, angegeben.

Großen Raum nimmt die quantitative Kopplungsanalyse ein, die eine breitere Basis für die Dekomposition bietet. Mit Bezug auf die Beschreibung im Frequenzbereich wird eine allgemeine Koppelfunktion des Mehrgrößensystems eingeführt, mit deren Hilfe alle wesentlichen Koppeleinflüsse und der maxi-

(Fortsetzung auf Seite 45)

Doz. Dr.-Ing. *Helmut Zietz* (52) studierte von 1953 bis 1959 an der TH Ilmenau Theoretische Elektrotechnik mit den Nebenfächern Regelungstechnik und Hochfrequenztechnik. Von 1959 bis 1962 war er als Entwicklungsingenieur für elektrische und elektronische Meß- und Regelgeräte im VEB Meßgerätewerk Quedlinburg tätig. Anschließend war er von 1963 bis 1970 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Meß-, Steuer- und Regelungstechnik an der TH Magdeburg. Nach der Promotion A zu nichtentkoppelten Zweigrößenregelungen im Jahr 1970 erfolgte 1971 die Berufung von Dr. *Zietz* zum Hochschuldozenten für Automatisierungstechnik an die IH Wismar.

Er verteidigte am 27. September 1985 die Dissertation B an der Fakultät für Technische Wissenschaften der Technischen Hochschule Magdeburg.

Doktorand: Dr.-Ing. *Helmut Zietz*

Vorsitzender der Prüfungskommission:
Prof. Dr. sc. techn. *J. Vogel*

Prof. Dr. sc. techn. *P. Neumann*
Prof. Dr. sc. techn. *F. Güttler*
Prof. Dr. sc. techn. *E. Aepler*

Gutachter:
Prof. Dr. sc. techn. *U. Korn*
Prof. Dr. sc. techn. *H. Töpfer*
Prof. Dr. sc. techn. *R. Müller*

Die Dissertation kann nur über die Bibliotheken der TH Magdeburg und der IH Wismar ausgeliehen werden.

msr 8529 Doz. Dr. sc. techn. *H. Zietz*, Ingenieurhochschule Wismar, Sektion Technologie der Elektrotechnik/Elektronik, Philipp-Müller-Straße, Wismar, 2400

Elektrische Meßtechnik. 1000 Begriffe für den Praktiker. Von *J. Schultz, K. Dörrer* und *G. Gubsch*. Berlin: VEB Verlag Technik 1986. 198 Seiten, 241 Bilder, 27 Tafeln, 17,— M. Bestell-Nr.: 553 590 6

In der dank ihrer Praxisnähe und Benutzerfreundlichkeit schon gut eingeführten Reihe „1000 Begriffe für den Praktiker" wird mit diesem Band ein wichtiges Gebiet der Meßtechnik behandelt. Neben den wesentlichsten allgemeinmeßtechnischen Fragen wird die Messung elektrischer Größen und in beschränktem Umfang auch die elektrische Messung nichtelektrischer Größen berücksichtigt. Die teilweise noch immer weit verbreiteten elektromechanischen Meßgeräte und Meßbrücken sind dabei am ausführlichsten dargestellt, während ausgesprochen moderne Entwicklungen und neue Technologien weniger stark ins Auge fallen. Fragen der Sicherheitstechnik sind erfreulicherweise recht umfassend aufgenommen worden. Hinter jedem Stichwort folgt zunächst eine Definition des jeweiligen Begriffes, die manchmal — dem Charakter des Buches entsprechend — etwas kurz und z. T. vereinfacht gehalten ist; danach werden, falls nötig, einige Erläuterungen und gelegentlich auch Beispiele angeführt. Am Schluß jedes Stichworts folgen Hinweise auf einschlägige Standards (TGL, DIN, VDE-Vorschriften), die in einem Anhang zusammengefaßt sind, während auf die Angabe anderer weiterführender Literatur verzichtet wurde.
Die Behandlung des Stoffes in der Form von Stichworten mit zugehörigen Erklärungen bringt es mit sich, daß viel von Verweisen Gebrauch gemacht werden muß, wobei einzelne Objekte teilweise sehr weit aufgesplittert sind. So beziehen sich z. B. auf die Oszilloskopie unmittelbar über 60 Stichworte, von denen etwa die Hälfte Erklärungen, die restlichen reine Verweise enthalten. Hier hätte sich, wie an anderer Stelle auch, manches zusammenfassen lassen. Erfreulich ist, daß man auch viele in der Meßtechnik gebräuchliche Abkürzungen erklärt findet.
Angesichts der begrifflichen Diskrepanzen, die in der allgemeinen Metrologie noch vielfach anzutreffen sind und die in einigen Fällen leider auch durch die als Quellen benutzten Standards nicht behoben werden können, mußten sich die Autoren zu bestimmten Auffassungen bekennen. Diese befinden sich mit denen des Rezensenten i. allg. in weitgehender Übereinstimmung. Problematisch ist jedoch in einer derartigen, um äußerste Kürze bemühten Publikation stets die Darstellung der Fragen von Meßgenauigkeit und Meßfehlerbehandlung, wobei festzustellen ist, daß diese Probleme — natürlich unter Berücksichtigung des angesprochenen Leserkreises — im großen und ganzen recht gut bewältigt wurden. Zu bemängeln ist lediglich, daß viele Aussagen zu den absoluten Fehlern in Wirklichkeit nur für die systematischen Anteile dieser Fehler gelten. Die Definition hinter dem Stichwort „DDU" ist offensichtlich nur ein sinnentstellender Druckfehler.
Insgesamt handelt es sich bei diesem Bändchen um eine recht gelungene, für den vorgesehenen Benutzerkreis sicherlich auch sehr nützliche lexikographische Darstellung dieses Wissensgebietes, das in der Praxis des Naturwissenschaftlers und Ingenieurs eine wichtige Rolle spielt. Deshalb wird es bestimmt zahlreiche Interessenten finden.

B 2192 *H. Hart*

Applications of Automatic Control Concepts to Traffic Flow Modeling and Control. Von *M. Papageorgiou*. Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo: Springer-Verlag. 186 Seiten.

Dieser Band der von *A. V. Balakrishnan* und *M. Thoma* herausgegebenen „Lecture Notes in Control and Information Sciences" befaßt sich mit der Anwendung moderner Verfahren der Regelungstheorie für die Modellierung und Steuerung des Verkehrsflusses auf Stadtstraßen und Autobahnen.
Ein solches Vorhaben ist zu begrüßen, da die kybernetischen Methoden der Modellbildungs- und Optimalsteuerungstheorie in der Forschung und Praxis der Straßenverkehrstechnik bis heute wenig Beachtung gefunden haben.
Im ersten Hauptteil (Kapitel 2 bis 4) des Buches befaßt sich der Autor mit der mikroskopischen und makroskopischen Modellierung des Verkehrsflusses. Dabei widmet er sich besonders den für Steuerungsaufgaben wichtigen makroskopischen Verkehrsflußmodellen, die er für Autobahnen und Stadtstraßen in Form von Zustandsgleichungen gewinnt. Für das entwickelte makroskopische, diskrete Autobahnverkehrsflußmodell mit den Zustandsvariablen „Verkehrsdichte" (in Fahrzeugen je Autobahnabschnitt) und „Verkehrsflußgeschwindigkeit" (im jeweiligen Autobahnabschnitt) führt er eine Fallstudie zur Off-line-Identifikation der Modellparameter durch, wobei reale Verkehrsmeßwerte eines in 5 Abschnitte unterteilten und 2650 m langen Teilstücks der Autobahn „Frankfurt/Main — Basel" Verwendung finden. Als On-line-Identifikationsaufgabe wird darüber hinaus ein Zustandsschätzproblem, die Schätzung der nicht meßbaren Verkehrsfluß-Zustandsvariablen, u. a. der mittleren Flußgeschwindigkeit in einem Autobahnabschnitt anhand meßbarer Verkehrsparameter z. B. der Verkehrsstromstärken (in Zahl der Fahrzeuge je Zeiteinheit) an den Abschnittsgrenzen behandelt.
Der zweite Hauptteil des Buches mit den Kapiteln 5 bis 7 ist der Anwendung moderner Steuerungskonzepte gewidmet. Nach einer Übersicht über die verschiedenen Zugänge zur Steuerung des Autobahn- und Stadtstraßenverkehrs befaßt sich der Autor mit hierarchischen Strukturen zur Lösung der Optimalsteuerungsprobleme (Kapitel 6), wobei sowohl für den Autobahn- als auch für den Stadtstraßenverkehr räumlich verteilte Multi-Mikrorechner-Steuerungssysteme zugrunde gelegt werden. Fragen der suboptimalen Mehrebenensteuerung nichtlinearer großer Systeme, insbesondere hinsichtlich der zweckmäßigen horizontalen und vertikalen Dekomposition des gesamten Steuerungssystems, werden am Beispiel des Autobahnverkehrs im abschließenden Kapitel 7 behandelt.
Ein Anhang enthält eine Zusammenstellung wichtiger Grundlagen zur Kalman-Filter-Theorie und zum Maximumprinzip von *Pontrjagin*, die dem Leser die Einarbeitung erleichtern soll.
Die Publikation ist besonders interessant für Wissenschaftler und Ingenieure, die sich mit der Anwendung moderner Verfahren der Regelungstheorie in Verkehrsprozessen oder ähnlich komplexen Systemen befassen. Sie sollte aber auch dem Fachmann der Straßenverkehrstechnik eine Möglichkeit bieten, sich mit den bisher wenig beachteten Instrumentarien der Modellbildungs- und Optimalsteuerungstheorie auseinanderzusetzen.

B 2107 *H. Strobel*

(Fortsetzung von Seite 44)

male Rahmen unproblematischer Kopplungen abgeschätzt werden können.
Bei der statischen Analyse kann Strukturinstabilität des Gesamtsystems und aller Subsysteme überprüft werden, wozu geeignete Bedingungen für ihren Ausschluß angegeben werden. In diesem Rahmen wird auch die Anwendung der Relative-Gain-Matrix zur Zuordnung von Stell- und Regelgrößen behandelt.
Für die dynamische Analyse im Frequenzbereich werden ein Ansatz zur Abschätzung wesentlichen kopplungsbedingten Allpaßverhaltens und einfache Bedingungen für verallgemeinerte Diagonaldominanz und Blockdiagonaldominanz als Grundlage der Dekomposition in Eingrößen- und Mehrgrößensubsysteme angegeben.
Am Schluß der Arbeit wird ein Entwurfsverfahren vorgestellt, das die Parameteroptimierung einer PI- oder PID-Reglermatrix für das Stör- bzw. Führungsverhalten mit der Realisierung der Diagonaldominanz verbindet und so das leidige Problem der näherungsweisen Entkopplung einer systematischen und gleichzeitig (unter Berücksichtigung der anliegenden Signale) optimalen Lösung zuführt.

KURZFASSUNGEN

Lunze, J.; v. Kurnatowski, B.:

Experimentelle Erprobung einer Einstellregel für PI-Mehrgrößenregler bei der Herstellung von Ammoniumnitrat-Harnstoff-Lösung

msr, Berlin 30 (1987) 1, S. 2–6

Am Beispiel einer großtechnischen Anlage zur Herstellung von Flüssigdünger wurde eine Einstellregel für Mehrgrößenregler erprobt. Da die Regelstrecke zeitvariabel ist und die Meßgrößen sehr stark gestört waren, ermöglichten die Experimente keine ausreichend genaue Prozeßidentifikation. Die Reglerparameter wurden durch ein systematisches Verfahren festgelegt und mit Hilfe von Robustheitsuntersuchungen für ihre Anwendung am unvollständig bekannten Prozeß überprüft. Der erhaltene Mehrgrößenregler befindet sich seit einem Jahr im Dauerbetrieb.

Zietz, H.:

Abschätzung der oberen Frequenzgrenze für die Stabilitätsanalyse von Mehrgrößenregelungen

msr, Berlin 30 (1987) 1, S. 7–10

Im Beitrag wird gezeigt, daß eine für das inverse Nyquist-Verfahren angegebene Bedingung für die Abschätzung der oberen Grenzfrequenz allgemein, auch für nicht diagonaldominante Mehrgrößenregelungen, anwendbar ist. Durch Übergang auf die Spaltensummennorm werden für diagonaldominante Mehrgrößenregelungen Beziehungen zwischen der Grenzfrequenz und der Schnittfrequenz der Eingrößenregelungen abgeleitet und die Abschätzung der Grenzfrequenz vereinfacht.

Müller, V.; Dittrich, A.:

Digitale Drehzahlregelung von stromrichtergespeisten Gleichstromantrieben

msr, Berlin 30 (1987) 1, S. 10–14

Der gegenwärtige Entwicklungsstand der Mikroelektronik bietet die Möglichkeit, die herkömmliche analoge Regelung von Gleichstromantrieben durch eine digitale auf Mikrorechnerbasis zu ersetzen. Es werden geeignete Regelalgorithmen ausgewählt und hinsichtlich Rechenaufwand, Störbeeinflussung, Regeldynamik und stationärer Laufruhe miteinander verglichen. Besondere Aufmerksamkeit wird einigen Problemen des Zusammenwirkens von Drehzahl- und unterlagerter Stromregelung gewidmet.

Müller, G.:

Projektierung von Mikrorechner-Automatisierungsanlagen als Informationssystem

msr, Berlin 30 (1987) 1, S. 15–20

Die Projektierung kann als komplexes Informationssystem beschrieben werden. Die Blöcke und Größen werden charakterisiert. Für die Projektierung und ihre Phasen Konzipierung, Entwurf und Ausführungsprojektierung wird unter dem informationellen Aspekt eine Begriffsdefinition gegeben. Aus den Eigenschaften der Informationen werden wesentliche Merkmale der Projektierung abgeleitet. Der effektivere Einsatz von CAD/CAM-Systemen erfolgt in den späteren Projektierungsphasen.

Schennerlein, B.:

Automatische Erkennung und Behebung von Prozeßstörungen während der spanenden Bearbeitung durch Funktionserweiterung der Seriensteuerung CNC 600-1

msr, Berlin 30 (1987) 1, S. 29–33

An numerische Steuersysteme für die bedienarme Fertigung wird zunehmend die Aufgabe gestellt, prozeßbegleitende Funktionen (Überwachung von Werkzeug, Werkstück, Handhabeoperationen u. ä.), die über den eigentlichen Bearbeitungsprozeß (Drehen, Bohren, Fräsen) hinausgehen, automatisch zu steuern. Derartige Überwachungseinrichtungen sollen es ermöglichen, Prozeßstörungen ohne Eingriff eines Bedieners automatisch zu beheben und den Bearbeitungsablauf an der Unterbrechungsstelle fortzusetzen. Im Beitrag wird eine Lösung mit Steuerungserweiterung für die Steuerung CNC 600 vorgestellt.

Breitmoser, H.-R.:

Ein nichtdispersives Modell zur Berechnung des Meßfehlers eines NDIR-Fotometers für Differenzmessungen

msr, Berlin 30 (1987) 1, S. 34–36

Es wird ein nichtdispersives Modell für NDIR-Fotometer abgeleitet. Dies bildet die Grundlage für die Berechnung des maximalen Fotometerfehlers, bei der als Einflußgrößen der Luftdruck, die Netzspannung, die Netzfrequenz, die gerätebedingte Nullpunkt- und Empfindlichkeitsdrift und für Differenzmessungen der Meßkomponenten-Absolutvolumenanteil berücksichtigt werden. Dieses Fehlermodell wird am Beispiel der CO_2-Differenzmessung in Luft angewendet.

РЕЗЮМЕ

Lunze, J.; v. Kurnatowski, B.:

Экспериментальное испытание правила установки регуляторов несколько величин ПИ при изготовлении раствора нитрата аммонии мочевины

Berlin msr, 30 (1987) 1, стр. 2–6

На примере крупнотехнической установки для изготовления жидкого удобрения испытано правило установки для регуляторов нескольких величин. Ввиду того, что объект регулирования временно переменный и измеряемые величины очень сильно возмущены, эксперименты не обеспечивали достаточно точную идентификацию процесса. Параметры регулирования установлены систематическим методом и проверены при помощи исследований жесткости для их применения на неполно известном процессе. Полученный регулятор нескольких величин с одного года находится в длительном режиме работы.

Zietz, H.:

Оценка верхнего частотного предела для анализа устойчивости регулирования нескольких величин

Berlin msr, 30 (1987) 1, стр. 7–10

В статье показано, что условие, указанное для обратного метода Найквиста, для общей оценки верхнего частотного предела возможно применять также и для недиагональнодоминатных регулирований нескольких величин. Переходом на норму суммы столбцов для диагональнодоминантных регулирований нескольких величин выведены отношения между предельной частотой и частотой среза регулирований одной величины и упрощена оценка предельной частоты.

Müller, V.; Dittrich, A.:

Цифровое регулирование числа оборотов приводов постоянного тока, питаемых от выпрямителей тока

Berlin msr, 30 (1987) 1, стр. 10–14

Настоящее состояние развития микроэлектроники дает возможность заменить традиционное аналоговое регулирование приводов постоянного тока цифровым регулированием на микровылислительной основе. Выбраны подходящие алгоритмы регулирования и сравнены друг с другом относительно затрат вычисления, воздействия помех, динамики регулирования и стационарного перерыва регулирования. Особое внимание уделяется ряду проблем совместного действия регулирования числа оборотов и подтонального регулирования тока.

Müller, G.:

Проектирование микровычислительных установок автоматизации как информационная система

Berlin msr, 30 (1987) 1, стр. 15–20

Проектирование может быть описано как комплексная информационная система. Характеризируются блоки и величины. Для проектирования и их фаз концепирования, разработки и проектирования исполнения дается под информационным аспектом определение понятий. Из свойств информации выведены основные признаки проектирования. Более эффективное применение систем САПР происходит в более поздних фазах проектирования.

Schennerlein, B.:

Автоматическое опознавание и устранение помех процесса во время обработки резанием путем расширения функции последовательного управления CNC 600-1

Berlin msr, 30 (1987) 1, стр. 29–33

К системам цифрового управления для производства с малым обслуживанием поставляется в растущей мере вопрос автоматического управления функциями, сопровождающими процесс (контроль инструментов, обрабатываемых изделий, операций манипулирования и подобн.), которые выходят из рамка процесса собственной обработки (точение, сверление, фрезерование). Такие устройства контроля должны делать возможным автоматическое устранение помех процесса без вмешательства обслуживающего персонала и продолжение хода обработки на месте прерывания. В статье показано решение с расширением управления для блока управления CNC 600.

Breitmoser, H.-R.:

Недисперсионная модель для расчета ошибки измерения фотометра NDIR для измерений разности

Berlin msr, 30 (1987) 1, стр. 34–36

Выведена недисперсионная модель для фотометра NDIR. Это служит основой для расчета максимальной ошибки фотометра, при котором как влияющие величины учитываются давление воздуха, сетевое напряжение, сетевая частота, обусловленный приборами дрейф нулевой точки и чувствительности, а для измерений разности — доля абсолютного объема измерительных компонент. Данная модель ошибки применяется на примере измерения разности CO_2 в воздухе.

SUMMARIES

Lunze, J.; v. Kurnatowski, B.:

Experimental Test of a Dimensioning Rule for Multivariable PI Controllers with the Production of Ammonium Nitrate-Carbamide Solutions

msr, Berlin 30 (1987) 1, pp. 2–6

A dimensioning rule for multivariable feedback controllers was tested in a large technological plant producing liquid fertilizer. The plant being time-variable and the measured values containing very high perturbations, the experiments didn't allow a process identification sufficiently accurate. The controller parameters were determined by a systematic approach and tested by means of robustness studies for their application with the process uncompletely known. The multivariable feedback controller obtained has been working in continuous operation since one year.

Zietz, H.:

Estimating the Upper Frequency Limit for the Stability Analysis of Multivariable Feedback Controls

msr, Berlin 30 (1987) 1, pp. 7–10

The author shows that a condition given for the inverse Nyquist method in estimating the upper limiting frequency can be generally applied also to multivariable feedback controls having no dominant main diagonal. For multivariable feedback control systems with dominating diagonal relations between the limiting frequency and the cut-off frequency of the single-variable feedback controls are derived and the estimation of the limiting frequency simplified by using the norm of the column sum.

Müller, V.; Dittrich, A.:

Digital Speed Control of Converter Direct Current Drives

msr, Berlin 30 (1987) 1, pp. 10–14

The present development state of microelectronics offers the possibility to replace the conventional analog feedback control of d.c. drives by a digital microcomputer-based control. The authors select suited feedback control algorithms and compare them one another as to computation expense, perturbation influence, control dynamics and stationary operation qualities. Some problems of the interaction of speed control and current subcontrol are taken into account particularly.

Müller, G.:

The Projection of Microcomputer-Based Automation Installations as Information Systems

msr, Berlin 30 (1987) 1, pp. 15–20

The projection can be described as a complex information system. The blocks and quantities are characterized. With regard to the information aspect a definition of notions is given for the projection and its stages of conception, design and executive projection. From the capacities of the information essential features of the projection are derived. The effective use of CAD/CAM systems takes place in the later projection stages.

Schennerlein, B.:

Automatic Recognition and Compensation of Process Perturbations During Cutting Machining by Functional Extension of the Control System CNC 600-1

msr, Berlin 30 (1987) 1, pp. 29–33

Numerical control systems for the operator-reduced manufacturing are increasingly required to control automatically functions accompanying the process (supervision of the tool, workpiece, manipulating operations etc.) and exceeding the proper process of machining (turning, drilling, milling). Such supervising devices should allow to compensate process perturbations without the intervention of an operator and to continue the machining process at the point of break. In this contribution a solution for extending the control system CNC 600 is presented.

Breitmoser, H.-R.:

A Non-Dispersive Model for Calculating the Measurement Error of a NDIR Photometer for Difference Measurements

msr, Berlin 30 (1987) 1, pp. 34–36

The author derives a non-dispersive model for NDIR photometers. This model forms the basis for calculating the maximal photometer error, as influencing quantities the air pressure, supply voltage, supply frequency, apparatus-dependent zero and sensitivity drift and for difference measurements the absolute volume portion of the measurement components being taken into consideration. This error model is applied to the example of the difference measurement of CO_2 in air.

RÉSUMÉS

Lunze, J.; v. Kurnatowski, B.:

L'épreuve expérimentale d'une règle de dimensionnement pour les régulateurs PI multivariables dans la fabrication des solutions de nitrate d'ammonium-urée

msr, Berlin 30 (1987) 1, pp. 2–6

Une règle de dimensionnement pour les régulateurs multivariables était éprouvée dans une grande installation technologique de la fabrication de l'engrais liquide. Parce que l'objet à asservir est variable en temps et les grandeurs de mesure sont très hautement perturbées, les expériences ne permettent pas une identification de processus suffisamment précise. Les paramètres de régulateur étaient déterminés par une méthode systématique et éprouvés à l'aide d'études de robustesse pour leur emploi au processus incomplètement connu. Le régulateur multivariable obtenu travaille en opération continue depuis une année.

Zietz, H.:

L'estimation de la limite fréquentielle supérieure pour l'analyse de stabilité des réglages à pulsieurs variables

msr, Berlin 30 (1987) 1, pp. 7–10

L'auteur montre qu'une condition donnée pour la méthode inverse de Nyquist dans l'estimation de la fréquence limite supérieure peut être appliquée généralement aussi aux systèmes asservis multidimensionnels qui n'ont pas une diagonale principale dominante. Pour les systèmes avec une diagonale dominante, des relations entre la fréquence limite et la fréquence de coupure des systèmes asservis monodimensionnels sont dérivées et l'estimation de la fréquence limite est simplifiée par l'emploi de la norme de somme par colonnes.

Müller, V.; Dittrich, A.:

Le réglage numérique de vitesse des entraînements à courant continu et convertisseur

msr, Berlin 30 (1987) 1, pp. 10–14

L'état présent du développement de la micro-électronique offre la possibilité de remplacer le réglage analogique conventionnel des entraînements à courant continu par un réglage digital basé sur micro-ordinateur. Les auteurs choisissent des aptes algorithmes de réglage et les comparent l'un l'autre quant à la dépense de calcul, influence perturbatrice, dynamique de réglage et caractéristique d'opération stationnaire. Quelques problèmes de l'interaction entre le réglage de vitesse et le sous-réglage de courant sont considérés particulièrement.

Müller, G.:

La projection des installations d'automatisation basées sur micro-ordinateurs comme système d'information

msr, Berlin 30 (1987) 1, pp. 15–20

La projection peut être décrite comme un système d'information complexe. Les blocs et les grandeurs sont caractérisés. Sous aspect d'information, une définition de notion est donnée pour la projection et ses phases de conception, de projet et de projection exécutive. A partir des qualités des informations, des caractéristiques essentielles de la projection sont dérivées. L'emploi efficace des systèmes CAO/FAO a lieu dans les phases de projection postérieures.

Schennerlein, B.:

La reconnaissance et la compensation automatiques des perturbations de processus pendant l'usinage par enlèvement de copeaux à l'aide d'une extension fonctionelle du système de commande CNC 600-1

msr, Berlin 30 (1987) 1, pp. 29–33

Les systèmes de commande numériques pour la fabrication à personnel réduit doivent, de plus en plus, commander automatiquement des fonctions accompagnantes le processus (surveillance des outils, pièces, opérations de maniement) qui dépassent le propre processus d'usinage (tournage, percage, fraisage). Tels dispositifs de surveillance doivent permettre de compenser les perturbations de processus automatiquement sans intervention d'un opérateur et de continuer l'usinage au point d'interruption. Dans la contribution, l'auteur présente une solution pour l'extension du système de commande CNC 600.

Breitmoser, H.-R.:

Un modèle non-dispersif pour le cacul de l'erreur de mesure d'un photomètre NDIR pour mesures de différence

msr, Berlin 30 (1987) 1, pp. 34–36

L'auteur dérive un modèle non-dispersif pour les photomètres NDIR. Ce modèle forme la base pour le calcul de l'erreur maximale de photomètre et, comme grandeurs d'influence, tient compte de la pression atmosphérique, tension secteur, fréquence du secteur, dérive de zéro et de sensibilité et, pour les mesures de différence, de portions volumétriques absolues des composants de mesure. Ce modèle d'erreur est appliqué à l'exemple de la mesure de différence de CO_2 en air.

Hierbei handelt es sich um neue Titel aus der UdSSR, die dem sowjetischen Neuerscheinungsdienst „Novye knigi“ entnommen sind. Die Bücher können über den Volksbuchhandel bestellt werden.

[1] *Žožikašvili, V.; Višnevskij, V.*: Seti massovogo obsluživanija (Netze von Bedienungssystemen). Radio i svjaz'. 4. Quart. 1987. NK 86—11 (25).

[2] *Zarakovskij, G.; Pavlov, V.*: Zakonomernosti funkcionirovanija ergatičeskich sistem (Gesetzmäßigkeiten des Funktionierens ergatischer Systeme). Radio i svjaz'. 3. Quart. 1987. NK 86—11 (26).

[3] *Klark, Dž., ml.; Kejn, Dž.*: Kodirovanie s ispravleniem ošibok v sistemach cifrovoj svjazi (Kodierung mit Fehlerkorrektur in Systemen der numerischen Verbindung. Übers. aus dem Engl.). Radio i svjaz'. 3. Quart. 1987. NK 86—11 (27).

[4] *Krasovskij, N.; Tret'jakov, V.*: Zadači upravlenija s garantirovannym rezul'tatom (Aufgaben der Steuerung mit garantiertem Ergebnis). Sredn. Ural. kn. izd-vo. 3. Quart. 1986. NK 86—11 (28).

[5] *Mackevic, V.*: Zanimatel'naja anatomija robotov (Anatomie des Roboters). Radio i svjaz'. 2. Quart. 1987. NK 86—11 (31).

[6] *Chochljuk, V.*: Parallel'nye algoritmy celočislennoj optimizacii (Parallelalgorithmen zur ganzzahligen Optimierung). Radio i svjaz'. 2. Quart. 1987. NK 86—11 (33).

[7] *Janbych, G.; Stoljarov, B.*: Optimizacija informacionno-vyčislitel'nych setej (Optimierung von Informations-Rechnernetzen). Radio i svjaz'. 3. Quart. 1987. NK 86—11 (34).

[8] *Vojšinskij, A.; Didenko, N.* u. a.: Gibkie avtomatizirovannye proizvodstva (Flexible automatisierte Produktion). Radio i svjaz'. 2. Quart. 1987. NK 86—11 (87).

[9] *Kejdžjan, K.*: Prognozirovanie nadežnosti mikroelektronnoj apparatury na osnove bol'šich integral'nych schem (Vorhersage der Zuverlässigkeit mikroelektronischer Apparaturen auf der Grundlage integrierter Schaltungen). Radio i svjaz'. 4. Quart. 1987. NK 86—11 (88).

[10] *Sorokopud, V.*: Avtointeraktivnoe konstruirovanie mikroelektronnych blokov sredstvami malych EVM (Interaktive Konstruktion mikroelektronischer Blöcke mit Hilfe von Kleinrechnern). Radio i svjaz'. 3. Quart. 1987. NK 86—11 (90).

[11] *Ačasova, S.*: Algoritmy sinteza avtomatov. programmiruemych matricach (Algorithmen zur Synthese von Automaten mit programmierbaren Matrizen). Radio i svjaz'. 1. Quart. 1987. NK 86—11 (175).

[12] *Balyberdin, V.*: Ocenka i optimizacija charakteristik sistem obrabotki dannych (Schätzung und Optimierung der Kenngrößen von Datenverarbeitungssystemen). Radio i svjaz'. 2. Quart. 1987. NK 86—11 (176).

[13] Dialogovye sistemy schemotechničeskogo proektirovanija (Dialogsysteme zur schaltungstechnischen Projektierung). Radio i svjaz'. 4. Quart. 1987. NK 86—11 (177).

[14] *Klark, K.; Makkejb, F.*: Mikro-PROLOG (Mikro-PROLOG. Übers. aus dem Engl.). Radio i svjaz'. 3. Quart. 1987. NK 86—11 (178).

[15] *Klejman, G.*: Školy buduščego: EVM i process obučenija (Die Schule der Zukunft: EDV-Anlagen im Lernprozeß. Übers. aus dem Engl.). Radio i svjaz'. 1. Quart. 1987. NK 86—11 (179).

[16] *Lysenko, E.*: Proektirovanie avtomatizirovannych sistem upravlenija technologičeskimi processami (Projektierung automatisierter Systeme zur Steuerung technologischer Prozesse). Radio i svjaz'. 4. Quart. 1987. NK 86—11 (180).

[17] *Mamzelev, I.*: Vyčislitel'nye sistemy v technike svjazi (Rechentechnische Systeme in der Nachrichtentechnik). Radio i svjaz'. 2. Quart. 1987. NK 86—11 (181).

[18] *Uolš, B.*: Nastojaščij BEJSIK (Richtiges BASIC. Übers. aus dem Engl.). Radio i svjaz'. 3. Quart. 1987. NK 86—11 (185).

[19] *Chorošavskij, V.*: Inženernyj analiz funkcionirovanija vyčislitel'nych mašin i sistem (Ingenieurtechnische Analyse der Funktion von Rechenmaschinen und -systemen) Radio i svjaz'. 4. Quart. 1987. NK 86—11 (187).

[20] Ekspertnye sistemy (Expertensysteme. Übers. aus dem Engl.). Radio i svjaz'. 2. Quart. 1987. NK 86—11 (188).

[21] *Elfring, G.*: Programmirovanie na jazyke ASSEMBLERA dlja mikro-EVM (ASSEMBLER-Programmierung für Mikrorechner). Radio i svjaz'. 3. Quart. 1987. NK 86—11 (190).

[22] Avtomatizacija schemotechničeskogo proektirovanija (Automatisierung schaltungstechnischer Projektierung). Radio i svjaz'. 4. Quart. 1987. NK 86—11 (247).

[23] *Gricevskij, P.; Mamčenko, A.* u. a.: Osnovy avtomatiki, impul'snoj i vyčislitel'noj techniki (Grundlagen der Automatik, Impuls- und Rechentechnik). Radio i svjaz'. 4. Quart. 1987. NK 86—11 (270).

[24] *Peti, Ž.-P.*: O čem mečtaet roboty? (Wovon träumen Roboter? Übers. aus dem Franz.). Mir. 3. Quart. 1986. NK 86—12 (206).

[25] *Geršunskij, B.*: Komp'juterizacija v sfere obrazovanija (Computerisierung im Bildungswesen). Pedagogika. 4. Quart. 1987. NK 86 to 12 (227).

[26] *Zvenigorodskij, G.*: Vyčislitel'naja technika i ee primenenie (Rechentechnik und ihre Anwendung). Prosveščenie. 3. Quart. 1987. NK 86—13 (82).

[27] *Peregoduv, M.; Chalamejzer, A.*: Čto umeet komp'juter? (Was vermag der Computer?). Prosveščenie. 1. Quart. 1987. NK 86—13 (137).

[28] *Rusckij, A.*: V mire robotov (In der Welt der Roboter). Prosveščenie. 4. Quart. 1987. NK 86—13 (152).

msr 8504

messen · steuern · regeln

Herausgeber: Kammer der Technik, Wissenschaftlich-Technische Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA)

Verlag: VEB Verlag Technik. Oranienburger Str. 13/14, PSF 201, Berlin, DDR-1020, Telegrammadresse: Technikverlag Berlin; Telefon: 28700; Telex: 0112228 techn dd

Verlagsdirektor: Dipl.-Ing. *Klaus Hieronimus*

Redaktion: Dr.-Ing. *Dietrich Werner*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2870362)
Dr.-Ing. *Jürgen Wede*, Redakteur (Telefon: 2870374)

Gestaltung: *Karen Wohlgemuth* (Telefon: 2870288)

Lizenz-Nr.: 1112 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik

AN (EDV): 15936

Erscheinungsweise: monatlich 1 Heft

Heftpreis: 4,— M, Abonnementpreis vierteljährlich 12,— M; Auslandspreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebs BUCHEXPORT zu entnehmen.

Gesamtherstellung: VEB Druckerei „Thomas Müntzer“, Bad Langensalza, 5820

Anzeigenannahme: Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigen-Annahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, Oranienburger Str. 13/14, PSF, 201, Berlin, 1020. Anzeigenpreisliste Nr. 7; Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, Hermann-Duncker-Str. 89, Berlin, DDR-1157

Erfüllungsort und Gerichtsstand: Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in andere Sprachen vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.

Bezugsmöglichkeiten:

DDR: sämtliche Postämter

SVR Albanien: Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propagandittt te Librit Rruga Konference e Pezes, Tirana

VR Bulgarien: Direkzia R.E.P., 11a, Rue Paris, Sofia

VR China: China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P.O. Box 88, Beijing

ČSSR: PNS — Ústřední Expedicia a Dovoz Tisku Praha, Slezska 11, 12000 Praha 2; PNS, Ústředná Expedicia a Dovoz Tlače, Posta 022 88547 Bratislava

SFR Jugoslawien: Jugoslovenska Knjiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarsko Produzeće MLADOST, Ilica 30, Zagreb

Koreanische DVR: CHULPANMUL Korea Publications Export & Import Corporation, Pyongyang

Republik Kuba: Empresa de Comercio Exterior de Publicaciones, O'Reilly No. 407, Ciudad Habana

VR Polen: C.K.P. i W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa

SR Rumänien: D.E.P. Bucureşti, Piata scienteii, Bucureşti

UdSSR: Städtische Abteilungen von Sojuzpečat oder Postämter und Postkontore

Ungarische VR: P.K.H.I., Külföldi Elöfizetései Osztály, P.O. Box 16, Budapest

SR Vietnam: XUNHASABA, 32, Hai Ba Trung, Hanoi

BRD und Berlin (West): ESKABE Komissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141—167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30

Österreich: Helios Literatur-Vertriebs-GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, A-2345 Brunn am Gebirge

Schweiz: Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstr. 109, 8033 Zürich

Alle anderen Länder: örtlicher Buchhandel; BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, Postfach 160, Leipzig, DDR-7010 und Leipzig Book Service, Talstraße 29, Leipzig, DDR-7010.

Abnahmebedingungen

Die Redaktion veröffentlicht nur solche Beiträge, die noch an keiner anderen Stelle des In- und Auslandes in dieser Form erschienen sind oder bis zur Veröffentlichung erscheinen werden und die die Verfasser bis zum Ablauf des ersten, dem Erscheinen folgenden vollen Kalenderjahres an keiner anderen Stelle veröffentlichen, ohne hierzu vorher die Zustimmung der Redaktion der Zeitschrift eingeholt zu haben. Mit der Abnahme und Veröffentlichung des Manuskriptes geht das ausschließliche Verlagsrecht für alle Sprachen und Länder auf den Verlag über. Es ist ohne ausdrückliche Genehmigung der Redaktion nicht gestattet, fotografische Vervielfältigungen, Mikrofilme u. a. von Heften der Zeitschrift, einzelnen Beiträgen oder von Teilen daraus herzustellen. Ferner behält sich die Redaktion Änderungsvorschläge nach der Durcharbeitung der Beiträge vor. Beiträge müssen eine Kopie der Veröffentlichungsfreigabe des Betriebes bzw. der Institution enthalten.
Richtlinien für die Manuskriptgestaltung sind dem Heft 1 (S. 28) messen steuern · regeln 1987 zu entnehmen bzw. werden von der Redaktion auf Anfrage zugesandt. Die Einhaltung dieser Gesichtspunkte garantiert eine sofortige Bearbeitung und verzögerungsfreie Veröffentlichung der Arbeit in der Zeitschrift.

3rd Symposium on Thermal and Temperature Measurement in Science and Industrie 1987

Das IMEKO-TC 12 „Temperature and Thermal Measurement" führt sein 3. Symposium vom 15. bis 17. September 1987 in Sheffield/Großbritannien durch. Veranstalter ist das Institute of Measurement and Control in London.
Als thematische Schwerpunkte sind vorgesehen:

- Grundlagen der Temperaturmeßtechnik
  Bestimmung der thermodynamischen Temperatur, Internationale Praktische Temperatur-Skala, Temperaturfixpunkte
- Methoden der Temperaturmessung
  Sensoren und Meßgeräte, Kalibration, Anwendungsbeispiele und theoretische Aspekte von Strahlungsthermometern, Widerstands-Thermometern und Thermoelementen, elektronischen und anderen Temperaturmeßverfahren; spezielle Anwendungen, z. B. die Messung heißer Gase und Flammen, dynamisches Verhalten und dessen Korrektur, Tieftemperaturmessungen
- Wärmestrom-Meßtechnik, Geräte und Anwendungen
  Wärmestromsensoren; Aufbau, Kalibration und Anwendungen (Gebäude, Industrieanlagen, Maschinenbau)
- Spezifische industrielle Probleme
  Temperaturmessung und Wärmestrombestimmung in der Biotechnologie bzw. mit Robotern; Kalorimetrie; Infrarot-Thermografie; Problemlösungen in verschiedenen Industriezweigen.

Anfragen können auch an den Vorsitzenden des IMEKO-TC 12
Doz. Dr.-Ing. *F. Bernhard*, Technische Hochschule Ilmenau, Postfach 327, Ilmenau, 6300, Telefon 74218,
gerichtet werden.

Moderne Technik von gestern

Unter diesem Titel gab die TH Leipzig eine von Dr. paed. *H. Rohr* (Vorsitzender des FUA „Geschichte der Automatisierungstechnik" der WGMA) verfaßte Broschüre heraus, die reichhaltige Informationen über das „Magazin zur Geschichte der Automatisierungs- und Elektroanlagentechnik" in Leipzig vermittelt. Auf insgesamt 84 Seiten erfährt der Leser in Schrift und Bild, welche historischen technischen Schätze ihn beim Besuch des o. g. Magazins an der TH Leipzig erwarten. Dieses Museum zur Geschichte der Entwicklung von Geräten und Anlagen der Automatisierungstechnik, das leider noch nicht seine endgültige, dem Inhalt angemessene Heimstatt gefunden hat und derzeit auf dem Dachboden eines Studentenwohnheims angesiedelt ist (s. auch msr, Berlin 28 (1985) 4, S. 183–184), birgt eine so überraschende Fülle an hochinteressanten und liebevoll gepflegten Gerätedetails, daß sich eine (auf jeweils etwa 10 Personen beschränkte und telefonisch zu vereinbarende) Besichtigung förmlich aufdrängt, zumal unter der sachkundigen Führung des Leiters dieses Magazins, Herrn Dr. *Rohr*, sicher jeder Besucher einen Wissenszuwachs erfährt. Die genannte Broschüre bereicherte die Tagungsunterlagen der Teilnehmer an der Wissenschaftlichen Konferenz „Anlagenautomatisierung" der TH Leipzig 1986.

Meßgerät für Trübung in Flüssigkeiten

Die optische Trübung in Flüssigkeiten, die durch feste oder flüssige Stoffe in ungelöster, feinverteilter Form hervorgerufen wird, kann mit einem neuen Meßgerät quantitativ erfaßt werden. Das Gerät mit der Bezeichnung SLP-3 ist ein kontinuierlich arbeitendes Streulichtfotometer und wurde am Institut für Biotechnologie der AdW der DDR für den VEB Getränkekombinat Leipzig entwickelt. Es verfügt über ein neuartiges Wirkprinzip zur Trübungsmessung und ist mit optoelektronischen Bauelementen bestückt, so daß auf bewegliche Funktionselemente verzichtet werden konnte. Mit dem Gerät lassen sich industrielle Prozeßabschnitte überwachen bzw. kann der Verlauf dieser Prozesse beeinflußt werden. SLP-3 ist z. B. in der chemischen Industrie, der Lebensmittelindustrie, der pharmazeutischen Industrie und in Wasseraufbereitungs- und Abwasserbehandlungsanlagen anwendbar. (ADN-BWT 1735-9a)

Robuste Sensoren in Glasfasertechnik

Sensoren mit Anschluß über optische Glasfaserleitungen sind unempfindlich gegen elektromagnetische Störungen, galvanisch von der Auswertetechnik getrennt, explosionsgeschützt und können klein und korrosionssicher gebaut werden.
Die Leitungen beeinflussen sich nicht gegenseitig.
Die schwedische Fa. *ASEA* hat entsprechende Sensoren für Temperatur und Vibrationsmessungen entwickelt. Der Temperatursensor basiert auf dem Prinzip, daß Licht, das von bestimmten Halbleiterkristallen absorbiert wird, mit einem Spektrum reemittiert wird, das nur von der Kristalltemperatur abhängt. Der Sensor besteht aus einer Glaskapillare, in der sich ein in Silikonharz eingegossener GaAs-Kristall befindet, der über eine Multimode-Glasfaser-Leitung mit der Meßeinrichtung verbunden ist. Von einer LE-Diode gelangt Licht mit einer Wellenlänge von 750 nm zum Sensor. Durch Vergleich mit dem reflektierten Spektrum können innerhalb von 5 ms Temperaturen zwischen 0 und 200 °C mit einer Genauigkeit von ±1 °C gemessen werden. Die Meßentfernung kann bis zu 500 m betragen.
Der Vibrationssensor mißt die Amplitudenänderung des von einem beweglichen GaAs-GaAlAs-Kristall reflektierten Lichtes. Der Beschleunigungssensor wiegt nur 3 g und hat in einem Frequenzbereich von 0 ... 1000 Hz einen Dynamikumfang von 70 dB bei einer Auflösung von 0,5 g.

Erster GaAs-Mikroprozessor

Die Entwicklung eines monolithischen 8-Bit-Mikroprozessors, der 100 Millionen Instruktionen je Sekunde verarbeitet, soll der Firma RCA/USA gelungen sein.
Die Taktfrequenz beträgt 200 MHz. Der Prozessor verfügt über 23 Befehle (19 mit 8 bit und 4 mit 16 bit Länge). Aufgrund der Pipelinestruktur können mehrere Befehle gleichzeitig verarbeitet werden. Die Betriebsspannung beträgt 2 V, die Leistungsaufnahme 450 mW. Der Prozessor ist zusammen mit TTL Anpassungsstufen in einem 84poligen stiftlosen Keramikgehäuse untergebracht.

Verstärkte Anwendung von Lichtleitern

Mit Zuwachsraten von 40% beginnen Lichtleiter immer mehr zu Konkurrenten der Kupfer- und Koaxialleitungen zu werden. In den europäischen NSW-Ländern soll das Marktvolumen im Jahr 1984 bereits 1,4 Mrd. US-Dollar betragen haben und bis 1990 auf 8 Mrd. US-Dollar anwachsen. Der größte Zuwachs wird bei der Datenkommunikation und lokalen Netzen im Büroautomatisierungsbereich mit etwa 55% erwartet; im industriellen Bereich rechnet man mit etwa 30%.
Neben dem vorwiegend verwendeten Wellenlängenbereich von 850 nm gewinnt der Bereich von 1,3 µm an Bedeutung, und der Bereich um 1,55 µm steht vor der Markteinführung.
Bei den Fasern im 1,3- und 1,55 µm-Bereich geht der Trend zu einem flachen Dispersionsverlauf, wodurch Multiplexbetrieb möglich wird.
Während viele Hersteller noch die Gradientenfaser verwenden, breitet sich die leistungsstärkere Monomodefaser aus. Die Gradientenfaser überträgt 140 Mbit/s und benötigt alle 18 km einen Verstärker, die Monomodefaser ermöglicht dagegen 565 Mbit/s mit Verstärkerabständen über 20 km, wobei 100 km angestrebt werden. In den USA ging die Gradientenfaser von 100% auf nur 20% im Jahr 1984 zurück.
Neben der höheren Übertragungsleistung verfügen Lichtleiterfasern über folgende Vorteile:

- Realisierung längerer verstärkerfreier Strecken
- Abhörsicherheit
- keine Beeinflussung benachbarter Fasern
- galvanische Trennung, Potentialfreiheit und Unempfindlichkeit gegenüber Erdschleifen
- geringes Gewicht
- mechanische und chemische Widerstandsfähigkeit.

ISSN 0026-0347, mess., steuern, regeln
Berlin 30 (1987) 1, S. 1—48